

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

MARCOS ALFRED BREHM

GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA FOTOVOLTAICA DISTRIBUÍDA POR
PEQUENOS CONSUMIDORES DOMÉSTICOS NO PARANÁ:
POTENCIALIDADES E ASPECTOS SÓCIO-AMBIENTAIS

CURITIBA

2014

MARCOS ALFRED BREHM

GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA FOTOVOLTAICA DISTRIBUÍDA POR
PEQUENOS CONSUMIDORES DOMÉSTICOS NO PARANÁ:
POTENCIALIDADES E ASPECTOS SÓCIO-AMBIENTAIS

Dissertação apresentada como
requisito parcial para obtenção do título
de Mestre em Meio Ambiente e
Desenvolvimento pelo Programa de
Pós-Graduação em Meio Ambiente e
Desenvolvimento da Universidade
Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Elisandro Pires
Frigo

CURITIBA

2014

TERMO DE APROVAÇÃO

MARCOS ALFRED BREHM

GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA FOTOVOLTAICA DISTRIBUÍDA POR PEQUENOS CONSUMIDORES DOMÉSTICOS NO PARANÁ: POTENCIALIDADES E ASPECTOS SÓCIO-AMBIENTAIS

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Meio Ambiente e Desenvolvimento pelo Programa de Pós-Graduação em Meio Ambiente e Desenvolvimento da Universidade Federal do Paraná:



Prof. Dr. Elisandro Pires Frigo
Orientador – Setor Palotina, UFPR



Prof. Dr. Carlos Henrique Coimbra Araújo
Setor Palotina, UFPR



Prof. Dr. Jair Antonio Cruz Siqueira
Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, UNIOESTE

Curitiba, Dezembro de 2014

Dedicatória

Ao nobilíssimo diretor, professor e gaudério de mais alto gabarito, Sr. Elisandro Pires Frigo, pelas longas sessões de orientação acadêmica e de desorientação ética. Ambas foram essenciais.

Ao professor, advogado e combatente em tempo integral, Sr. Rafael Fillippin, pelo incentivo à carreira acadêmica e pelo bom exemplo de militância inteligente e objetiva, coisa rara hoje em dia. Ambos foram essenciais.

Ao Sr. Rodrigo Silvestre, estimada e amicíssima ave estrigiforme, pela ajuda essencial na estruturação deste trabalho e pela discussão a esmo sobre assuntos estritamente aleatórios. Ambos foram essenciais.

À Claudia Cardoso, vulgo Claudinha, pela apoio irrestrito (da correção de provas e trabalhos de alunos durante as madrugadas até o adestramento e contenção da prole) e pelo invento do amor. Ambos foram essenciais.

Ao Sr. Otto Cardoso Brehm e ao Sr. Leo Cardoso Brehm por terem atrapalhado intensamente a produção deste trabalho com incontáveis brincadeiras, pulos, gritos, choros, correrias, risadas e afins. Ambos foram divertidíssimos.

Agradecimentos

Ao Sr. Maycon Ribeiro Macedo, da Copel Distribuição S.A., pelas informações fundamentais ao trabalho, sempre com presteza e cordialidade.

Ao Prof. Dr. Jair Antonio Cruz Siqueira pelas sugestões de referências e de organização do trabalho.

Ao Prof. Dr. Carlos Henrique Coimbra Araújo pelas sugestões e pela primordial lembrança de se citar a obra de Albert Einstein em relação ao fenômeno fotoelétrico.

À Prof. Dr. José Luiz Cerveira pela troca de ideias e pelas dicas bibliográficas excelentes.

À Prof. Dra. Eleusis Ronconi de Nazareno pela ajuda e apoio incondicionado a todos alunos do PPGMADE.

À Prof. Dra. Naina Pierri Estades, pela militância inspiradora e pela compreensão e apoio na entrega da versão final do trabalho.

À Prof. Dra. Sigrid de Mendonça Andersen, pelo entusiasmo motivador em relação à política brasileira e ao futuro.

À todos alunos e funcionários do PPGMADE que, de forma ou outra, ajudaram no decorrer dos trabalhos.

"Movimentar a matéria em quantidades necessárias
a nossa existência não é, decididamente,
um dos objetivos da vida humana."

Bertrand Russel ("*Elogio ao ócio*", 1935)

RESUMO

O principal objetivo do trabalho é analisar o panorama atual da micro geração fotovoltaica distribuída por pequenos consumidores no Estado do Paraná, para inferir se tal tecnologia seria viável como possível fonte geradora de energia.

Para tanto, é realizada uma pesquisa bibliográfica sobre o tema, que evidencia a pouca representatividade dos sistemas de geração fotovoltaica distribuídas no Brasil e no mundo, e demonstra que este tipo de sistema: pode ser usado por pequenos consumidores; injeta energia na rede elétrica; não utiliza baterias; precisa ser combinado com outras formas de geração; está devidamente normatizado no Brasil; já começa a ser economicamente viável em algumas localidades brasileiras; causa pouco impacto ambiental. É então levantada uma lista com todos pedidos para ligação deste tipo de sistema à rede Elétrica no Paraná até Novembro de 2013 junto à empresa concessionária (COPEL), e estes somam dez solicitações no período de quase um ano de suporte normativo. A radiação solar incidente no Brasil se mostra especialmente intensa, inclusive na região paranaense, o que é evidenciado pelo resultado das seis simulações de geração de energia elétrica para um sistema estático de 1kWp realizadas a partir da posição das cidades: Curitiba, Fortaleza, Munique, Hamburgo, Sevilha e Santander. Aspectos como "custo social da energia" e de cálculo de eficiência energética começam a ter maior visibilidade em artigos científicos, e a conversão fotovoltaica apresenta boas características nesse sentido. No entanto, o atual planejamento energético Brasileiro prioriza a construção de novas grandes usinas ao invés de procurar melhorar a eficiência energética do sistema. Pode-se concluir que a tecnologia de micro geração fotovoltaica distribuída já se mostra viável em aspectos ambientais, técnicos, normativos e está muito próxima de se viabilizar economicamente no Brasil, no entanto poderia ser fomentada através de medidas como: tarifas "feed in", subsídios ao investimento inicial, incentivos à aquisição da energia produzida, planos de educação e treinamento na área, fundos de investimentos para aquisição de sistemas fotovoltaicos; e novos padrões em edificações sustentáveis. Faz-se necessário, assim, não somente que se aprofundem estudos acerca de novas tecnologias, eficiência, poluição, etc., mas que estes estudos efetivamente comecem a balizar estratégias políticas.

Palavras chave: Energia fotovoltaica, viabilidade, Paraná, eficiência energética, complexidade.

ABSTRACT

The main objective of this work is to analyze the status of micro on grid photovoltaic on grid generation by small energy consumers in the State of Paraná, to infer if this technology would be viable as possible source of energy. For this, a literature search on the subject is performed, which shows the modest representation of on grid photovoltaic generation systems in Brazil and the world, and shows that this type of system: can be used by small consumers; injects energy into the power grid; does not use batteries; must be combined with other forms of generation; is properly regulated by standards in Brazil; is beginning to be economically viable in some Brazilian cities; causes less environmental impact. It is then raised a list of all requests for connection of this type of system to the electrical grid in Paraná until November 2013 by the utility company (COPEL) , and it results in ten requests in the period of almost one year of regulatory support. The incident solar radiation in Brazil shows particularly intense , including the Paraná region , as evidenced by the results of the six energy generation simulations for a 1kWp static system executed assuming the position of the cities: Curitiba, Fortaleza, Munich, Hamburg, Seville and Santander. Aspects such as "social cost of energy " and energy efficiency calculation begin to have greater visibility in scientific articles , and the photovoltaic conversion has good features accordingly. However , the current Brazilian energy planning prioritizes new large hydroelectric power plants construction rather than seek to improve the energy efficiency of the system. It can be concluded that the on grid micro photovoltaic generation technology is already viable in aspects as: environmental, technical , regulatory and is very close to become economically viable in Brazil , however it could be encouraged by measures such as: feed in tariffs; initial investment subsidies, incentives for produced energy purchase, education and training plans in this segment, investment funds for the photovoltaic systems purchase; and new standards about sustainable buildings. It is necessary, therefore, not only more detailed studies about new technologies, efficiency, pollution, etc., but also more of these studies actually beginning to mark out political strategies.

Keywords : Photovoltaics , viability , Paraná , energy efficiency , complexity.

INDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Consumo total mundial de energia (em milhões de toneladas de petróleo) ao longo do tempo (de 1985 a 2012).	pg. 17
Figura 2 - Consumo total de energia no Brasil (em milhões de toneladas de petróleo) ao longo do tempo (de 1970 a 2010).	pg. 18
Figura 3 - Oferta interna total de energia elétrica em 2012 no Brasil (em percentual) de um total de 592,8 TWh.	pg. 19
Figura 4 - Comparação de radiação solar anual com os estoques mundiais totais de energia não renovável, para comparação da ordem de magnitude	pg. 32
Figura 5 - Esquema representando geração de corrente elétrica através do fenômeno fotovoltaico.	pg. 36
Figura 6 - Principais tipos de módulos fotovoltaicos comerciais utilizados atualmente.	pg. 38
Figura 7 - Telha fotovoltaica.	pg. 40
Figura 8 - Evolução da capacidade instalada mundial em geração fotovoltaica (em MWp) de 1995 a 2010.	pg. 43
Figura 9 - Evolução da capacidade instalada mundial em geração fotovoltaica (em percentual) de 1995 a 2010.	pg. 43
Figura 10 - Esquema básico de um sistema de geração fotovoltaica conectada à rede elétrica (grid-tie).	pg. 46
Figura 11 - Comparação de custo de energia gerada a partir de um sistema fotovoltaico no Brasil em comparação com o preço praticado pela concessionária de energia	pg. 50
Figura 12 - Matriz de posicionamento de regiões em relação à viabilidade de sistemas de geração fotovoltaicos integrados à rede elétrica.	pg. 51
Figura 13 - Evolução do tempo de "payback energético" de silício cristalino ao longo do tempo na Europa.	pg. 54
Figura 14 - Soma anual da energia média irradiada horizontalmente entre 1999 e 2011 no Brasil.	pg. 61
Figura 15 - Soma anual da energia média irradiada horizontalmente entre 1999 e 2011 na Espanha.	pg. 62
Figura 16 - Soma anual da energia média irradiada horizontalmente entre 1999 e 2011 na Alemanha.	pg. 63
Figura 17 - Evolução da participação dos países em capacidade instalada de geração fotovoltaica (em percentual) entre os anos de 2000 e 2010.	pg. 64
Figura 18 - Resultado geral da simulação que mostra o percentual de geração de energia em cada região em relação ao melhor caso (Sevilha). Fonte: Autor	pg. 71
Figura 19 - Fluxo energético total no Brasil em 2012.	pg. 81
Figura 20 - Fluxo de energia elétrica total no Brasil em 2012.	pg. 82

GLOSSÁRIO DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AC	Alternate Current (ou corrente alternada - CA)
ANA	Agência nacional de águas
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
BIPV	Building Integrated Photovoltaics
BoS	Balance of System
CA	Corrente alternada
CC	Corrente contínua
COPEL	Empresa Paranaense de Energia
CRESESB	Centro de Referência para Energia Solar e Eólica
DC	Direct Current (ou corrente contínua - CC)
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
GasAs	Arsenieto de gálio
IEC	International Electrotechnical Commission
IMDB	Internet Movie Database
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
LCOE	Levelized Cost of Energy
NREL	National Renewable Energy Laboratory
NTC	Norma técnica COPEL
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
PTI	Parque Tecnológico Itaipu
STC	Standard test conditions

INDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Comparação dos custos por Watt de potência média ininterrupta (energia firme) para os sistemas hidráulico (Belo Monte) e fotovoltaico (modalidade distribuída) (pg. 24
Tabela 2 - Listagem dos inversores homologados pela concessionária COPEL até 4 de Março de 2014 para utilização em micro e mini geração distribuída.	pg. 45
Tabela 3 - Preço unitário de sistemas completos (exceto montagem)	pg. 49
Tabela 4 - Fator geral de eficiência de conversão de corrente contínua para corrente alternada.	pg. 67
Tabela 5 - Listagem total de pedidos de ligação pra geração fotovoltaica distribuída no estado do Paraná recebidos até a data de 14 de Novembro de 2013.	pg. 69
Tabela 6 - Simulações para instalação de painéis fixos com total de potência instalada de 1kWp em diferentes localidades, mostrando a geração de energia (em kWh) a cada mês.	pg. 70
Tabela 7 - Listagem geral de pedidos de ligação pra micro e mini geração distribuída no estado do Paraná recebidos até a data de 14 de Novembro de 2013.	pg. 83
Tabela 8 - Resultados das simulações de geração de energia fotovoltaica utilizando-se o software PVWATTS para a cidade de Munique.	pg. 84
Tabela 9 - Resultados das simulações de geração de energia fotovoltaica utilizando-se o software PVWATTS para a cidade de Hamburgo.	pg. 85
Tabela 10 - Resultados das simulações de geração de energia fotovoltaica utilizando-se o software PVWATTS para a cidade de Sevilha.	pg. 86
Tabela 11 - Resultados das simulações de geração de energia fotovoltaica utilizando-se o software PVWATTS para a cidade de Santander.	pg. 87
Tabela 12 - Resultados das simulações de geração de energia fotovoltaica utilizando-se o software PVWATTS para a cidade de Fortaleza.	pg. 88
Tabela 13 - Resultados das simulações de geração de energia fotovoltaica utilizando-se o software PVWATTS para a cidade de Curitiba.	pg. 89

Sumário

Introdução	12
1. Revisão bibliográfica	15
2. Motivação e Fundamentação teórica	20
2.1 Início da geração de energia elétrica versus conflitos.....	20
2.2 Eficiência energética	25
2.3 Potencial de geração solar no mundo.....	31
2.4 Tecnologia fotovoltaica	34
2.5 Mini e Micro Geração distribuída.....	41
2.6 Custo do sistema fotovoltaico	47
2.7 Payback energético de painéis fotovoltaicos	53
2.8 Perdas de transmissão	54
2.9 Interesses políticos e econômicos	56
3. Objetivos	58
4. Metodologia.....	59
4.1 Potencial solar em diferentes regiões	60
4.2 Simulação de geração fotovoltaica	64
5. Resultados	69
5.1 Geração de energia fotovoltaica distribuída no Paraná	69
5.2 Resultados da simulação	70
6. Conclusões.....	73
8. Referências	75
9. Anexos	81

Introdução

O consumo humano de energia pode ser dividido, basicamente, em endossomático, necessário para a alimentação e processos biológicos, e o consumo exossomático, relacionado a moradia, transporte, etc., e, portanto, ligado também a características culturais. O segundo (do qual o primeiro, de certa forma também depende) é, atualmente, baseado principalmente em fontes não renováveis, com grande destaque para o carvão, petróleo e gás. A história do uso, geração e desenvolvimento da energia elétrica foi permeada de conflitos em relação a diferentes tecnologias de geração e transmissão, que sucederam-se desde seus primórdios até os dias atuais.

A energia disponível à humanidade é, em essência, de origem solar e, portanto, discute-se basicamente como esta energia pode ser convertida em outras formas sob métodos menos impactantes à vida humana. Neste sentido, a energia fotovoltaica se mostra extremamente apropriada no que tange aos aspectos de eficiência energética e ambientais.

A tecnologia fotovoltaica é chamada de "tecnologia de estado sólido" por transformar a energia luminosa diretamente em energia elétrica sem usar partes móveis. O Brasil já possui embasamento normativo para a micro geração (até 100kWp instalados) e mini geração (até 1MWp instalados) distribuídas, cujo marco normativo foi a resolução nº 482 de 2012 da ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica), e que consiste em possibilitar ao pequeno consumidor gerar sua própria energia elétrica e injetar o excedente diretamente na rede elétrica sem que se faça necessário qualquer tipo de armazenamento da energia gerada em baterias, de acordo com normas já determinadas pela ABNT. Na modalidade adotada, geram-se créditos de energia junto à concessionária, que podem ser utilizados, sob forma de energia consumida da rede elétrica, em outros períodos.

O Brasil está muito próximo de viabilizar economicamente a geração fotovoltaica distribuída, sendo necessário, para tanto: uma leve redução do

custo dos equipamentos necessários para a geração fotovoltaica distribuída, ou então um aumento do preço da energia.

Muito embora a região de Curitiba apresente resultados piores (com menor nível de insolação) do que as regiões de maior insolação no Brasil, apresenta potencial de geração de cerca de 80% da energia que seria gerada nestas regiões de grande insolação, utilizando o mesmo tipo de equipamento (mesma potência instalada). Em comparação com a melhor região da Alemanha (Munique), Curitiba ainda apresenta resultados extremamente satisfatórios.

O tempo que um painel fotovoltaico comum leva para gerar a energia consumida durante sua própria produção não inviabiliza a utilização desta tecnologia, pois este período gira em torno de um ano enquanto os painéis atuais têm vida útil de mais de 20 anos.

Uma das grandes vantagens do sistema de geração fotovoltaico distribuído reside justamente no fato do mesmo não apresentar "perdas de transmissão", já que a geração é feita na própria unidade consumidora, não havendo necessidade, portanto, de novos investimentos em transmissão de energia.

O atual planejamento energético prioriza a construção de novas grandes usinas ao invés de procurar melhorar a eficiência energética do sistema, afinal o setor industrial, no qual destacam-se indústrias eletro-intensivas de grande porte para produção de alumínio, celulose ou ligas de ferro, etc., é o maior consumidor de energia entre os demais setores, e a geração fotovoltaica distribuída, por exemplo, muito embora possa suprir as demandas de energia de pequenos consumidores, não se mostra viável para suprir a demanda de destes consumidores eletro intensivos, para os quais são necessárias obras de grande porte, construídas por empresas empreiteiras com grande articulação política.

Faz-se necessário, assim, não somente que se aprofundem estudos acerca de novas tecnologias, eficiência de processos produtivos e de

conversão, emissão de poluentes e outros gases, etc., mas que estes estudos efetivamente comecem a balizar estratégias políticas. O Brasil já se encontra com todo o aparato normativo necessário para permitir ao pequeno consumidor que exerça o papel de micro-gerador de energia elétrica, o que representa, haja vista a redução no custo de sistemas de geração fotovoltaica distribuída, e, portanto, no custo da energia gerada através desta tecnologia, uma nova e real possibilidade (agora aos pequenos consumidores) de se gerar energia de forma alternativa aos sistemas predominantes, baseados em tecnologia hidroelétrica.

1. Revisão bibliográfica

Na visão de Martinez-Alier (1996), as necessidades humanas são satisfeitas pelo consumo endossomático de energia, relacionado à alimentação da qual depende a biologia humana; e pelo uso exossomático, relacionado aos gastos energéticos e de materiais com moradia, transporte, produção, e que estão estreitamente relacionados com a cultura e o modelo de desenvolvimento de cada população. Portanto, a energia consumida pelo homem pode ser dividida, ainda segundo esse autor, entre duas formas distintas: a energia endossomática e a energia exossomática. A primeira é recebida sob forma de alimentos e é oriunda das cadeias ecológicas; e a segunda é auferida através de máquinas e equipamentos desenvolvidos através de processos tecnológicos.

Com a evolução da técnica, os meios de conversão de energia se tornaram cada vez mais diversos e eficientes, e, ao mesmo tempo, os processos endossomáticos passam a ter menor participação no consumo total de energia relativa à vida humana, sendo, historicamente, a revolução industrial um marco neste processo. Muito embora ambas as formas de energia estejam associadas à "sobrevivência produtiva" da espécie, é certo que boa parte da energia exossomática, associada, por exemplo, a energia elétrica, gasolina, água ou geração de resíduos sólidos, seja utilizada para outros fins que não às necessidades básicas humanas, variando-se esta proporção de acordo com o nível e tipo de consumo e produção de cada localidade.

A própria definição do que seriam as "necessidades básicas" humanas é muito discutida, sendo que pelo Modelo Mundial Latino-americano, proposto pela Fundação Bariloche (MARTINEZ-ALIER, 1996), podem ser considerados como limites mensuráveis para a "sobrevivência produtiva": a) consumo de 3000 kcal e 100 gramas de proteínas por pessoa dia; b) disponibilidade para moradia de uma casa de 50 m² de área habitável por família e; c) obtenção de no mínimo 12 anos de educação básica (matrícula escolar de todas as crianças entre 06 e 17 anos).

Muito embora a demanda energética essencial à sobrevivência humana para o cumprimento destes requisitos básicos possa ser muito variável em relação a diferentes regiões, de fato tem-se que, em termos mundiais, a mesma se mostra inferior ao consumo total mundial de energia. No entanto, grande parte da população ainda vive em condições de sobrevivência abaixo destes três limites de "sobrevivência produtiva". Isso se mostra claro ao analisar-se a grande disparidade de padrões de consumo humano, especialmente comparando países mais desenvolvidos e menos desenvolvidos, se deu em paralelo a um processo que, com mais força a partir do Século XIX, levou a humanidade a uma grande dependência dos órgãos exossomáticos de conversão de energia, sendo que a utilização da energia elétrica é um dos grandes marcos desta transformação. A propósito dessa disparidade, ela se perpetuou pelo Século XX e chegou ao Século XXI:

“Após trinta anos voltados ao desenvolvimento, o grande desequilíbrio Norte/Sul permanece e as desigualdades se agravam. Os 25% da população do Globo que vivem nos países ricos, consomem 75% da energia; (...)”
(MORIN, 2003)

Em relatório divulgado em Maio de 2011, o IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change*) mostra que o consumo mundial de energia poderá passar dos cerca de 500EJ anuais atuais a até 1000EJ anuais em 2050. O mesmo relatório indica também que mais da metade das suas possíveis previsões a respeito da parcela de contribuição das fontes de energia renovável no futuro mostravam que estas energias representarão uma fatia de pelo menos 17% do fornecimento total em 2030, e aumentarão para 27% em 2050. Os cenários com a maior fatia para as fontes renováveis mostravam uma contribuição de 43% em 2030 e 77% em 2050. Tem-se, portanto, um cenário futuro de provável aumento na geração e consumo de energia, e, por conseguinte, de provável investimento em fontes de energia renovável.

Muito embora as taxas de crescimento das fontes energéticas renováveis da matriz mundial se mostrem elevadas, em termos absolutos essas fontes de produção de energia são pouco representativas em comparação, por exemplo, ao carvão. Este recurso, embora não seja o combustível mais utilizado pela humanidade (que é o petróleo), teve o maior aumento de utilização nos últimos anos. A seguir, uma ilustração sobre o consumo de energia total mundial (em milhões de toneladas de petróleo equivalente) em relação as diferentes alternativas energéticas da matriz mundial:

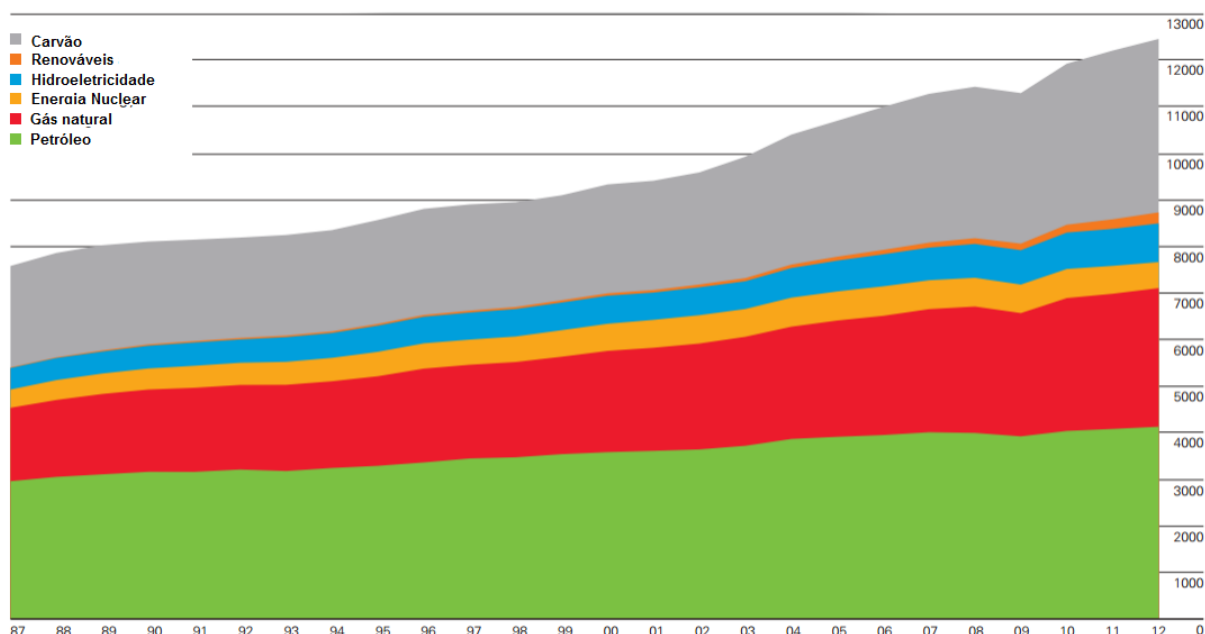


Figura 1 - Consumo total mundial de energia (em milhões de toneladas de petróleo) ao longo do tempo (de 1985 a 2012). Fonte: Statistical Review of World Energy June 2013

No Brasil, muito embora o cenário seja, do ponto de vista ambiental, mais animador do que a média mundial, ainda observa-se grande dependência de petróleo e derivados, conforme pode-se analisar pelo gráfico a seguir, que mostra o consumo final de energia no Brasil por fonte, em milhões de toneladas de petróleo equivalente (mesma unidade do gráfico anterior) retirado do Balanço Energético Nacional de 2013, formulado pela Empresa de Pesquisa Energética - EPE.

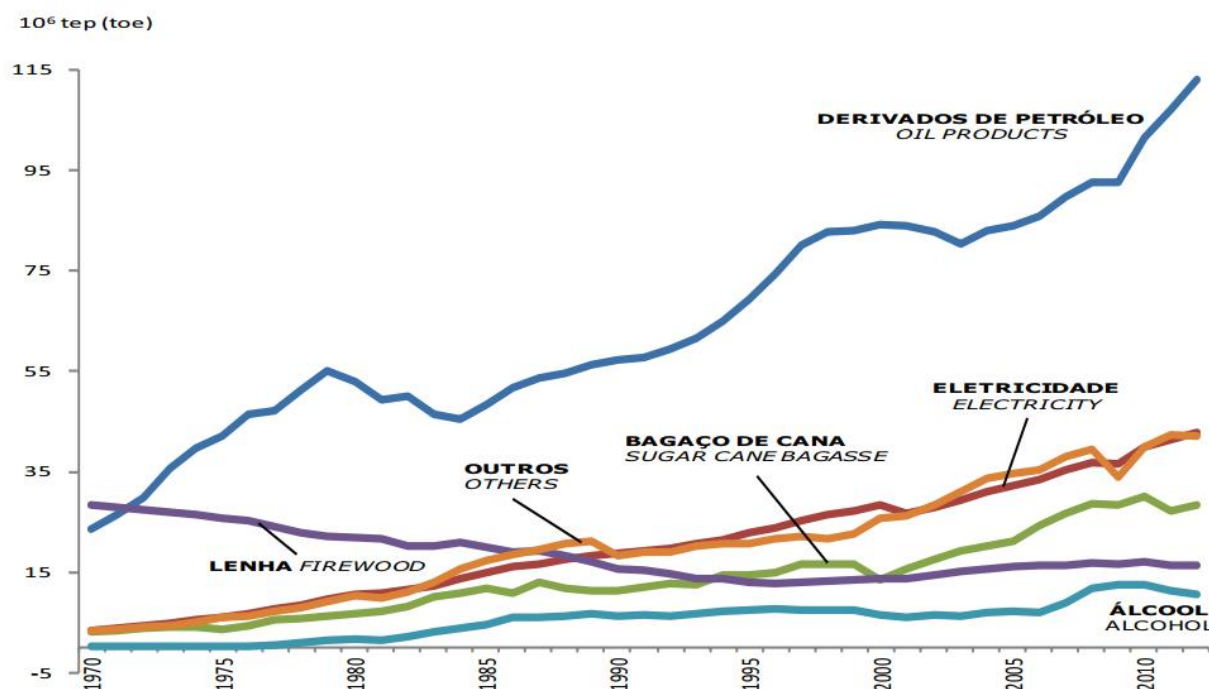
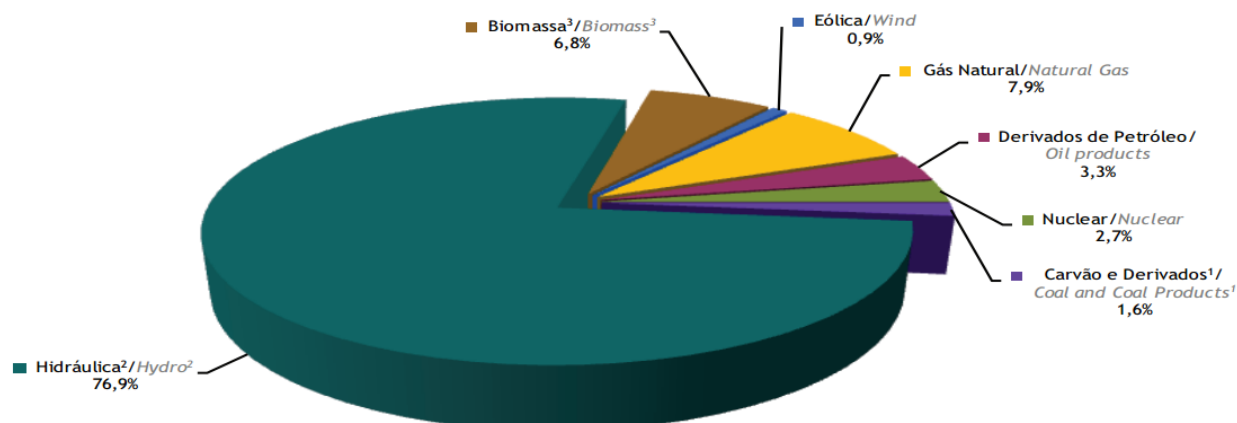


Figura 2 - Consumo total de energia no Brasil (em milhões de toneladas de petróleo) ao longo do tempo (de 1970 a 2010). Fonte: EPE (Balanço Energético Nacional de 2013)

Conforme pode-se observar no gráfico a seguir, retirado do Balanço Energético Nacional de 2013, formulado pela Empresa de Pesquisa Energética - EPE, em relação especificamente à energia elétrica, o Brasil tem grande parcela do montante total proveniente de fontes renováveis, ressaltando-se a energia hidroelétrica. No entanto a energia solar fotovoltaica sequer é relacionada no gráfico, por não ser suficientemente representativa.

Nas figuras 19 e 20, encontradas nos anexos, é possível analisar o fluxo de energia elétrica no Brasil (que deixa clara a dependência por hidroeletricidade) e o fluxo energético total no Brasil em 2012, que por sua vez, mostra as contribuições de cada fonte de energia no total consumido.



Notas/ Notes:

¹ Inclui gás de coqueria/ Includes coke oven gas

² Inclui importação de eletricidade/ Includes electricity imports

³ Inclui lenha, bagaço de cana, lixívia e outras recuperações/ Includes firewood, sugarcane bagasse, black-liquor and other primary sources

Figura 3 - Oferta interna total de energia elétrica em 2012 no Brasil (em percentual) de um total de 592,8 TWh. Fonte: EPE (Balanço Energético Nacional de 2013)

Observa-se, assim, que o consumo de energia final de caráter exossomático humano é baseado principalmente em fontes não renováveis como o carvão, petróleo e gás, e, muito embora se mostre, em média, superior ao necessário para suprir as necessidades mínimas de todas as pessoas do planeta, não o faz devido a uma grande disparidade observável no consumo entre nações pobres e nações ricas. Observa-se ainda uma previsão de grande aumento de consumo de energia no mundo, da qual boa parcela é e continuará sendo representada pelo uso em forma de energia elétrica, cuja matriz no Brasil é baseada principalmente na hidroeletricidade, e na qual a energia fotovoltaica não é representativa.

Como poderá ser observado no decorrer do trabalho, tem-se que a situação do Paraná não é muito diferente do resto do país, muito embora o Estado já tenha todo o amparo normativo necessário para garantir a assistência aos novos pedidos de ligação de novos sistemas fotovoltaicos na rede elétrica.

2. Motivação e Fundamentação teórica

Nesta parte do trabalho são apresentadas as referências que têm discutido o tema, em especial a relação do consumo de energia no mundo vistos a partir dos conflitos históricos e atuais. Os aspectos relacionados à complexidade do tema em relação às diferentes óticas de análise. O aparente potencial de utilização de energia solar no mundo, principalmente considerando a energia fotovoltaica, que por sua vez será discutida mais acuradamente. Em seguida será abordado o sistema de geração distribuída no Brasil, e, por fim, a situação atual de geração fotovoltaica distribuída no Estado do Paraná.

2.1 Início da geração de energia elétrica versus conflitos

As polêmicas durante os processos de definição de padrões técnicos para transmissão de energia oriunda das matrizes de geração hidráulica remontam aos primeiros sistemas implantados nos Estados Unidos, durante o final do século XIX e início do século XX. No entanto, durante os primeiros anos de existência da distribuição de eletricidade, os sistemas de transmissão via corrente contínua foram adotados como padrão nos Estados Unidos, e a empresa que detia a patente e era principal fabricante destes sistemas na época era a General Electric, de Thomas Edison, que não queria perder seus royalties sobre os sistemas implantados (MCNICHOL, 2006 pg. 80). Um dos marcos da geração de energia elétrica no mundo foi o início da construção do complexo das cataratas do Niágara, o maior do mundo na época (MONTICELLI; GARCIA, 2003 pg. 15), com 75MW de potência instalada (DEPARTMENT OF INTERIOR, 1899).

Em 1891, durante a *International Electrotechnical Exhibition* foi apresentada a mais longa linha de transmissão de energia do mundo, que na época tinha 175 quilômetros, e usava corrente alternada trifásica, na mesma época do desenvolvimento, por Nikola Tesla, do primeiro motor de corrente

alternada (que ficou pronto em 1892), cuja patente foi adquirida pelo industrial Westinghouse, ajudaram a trilhar o caminho para a adoção do atual sistema adotado praticamente por todo o mundo (MONTICELLI; GARCIA, 2003 pg. 15).

Em quase todo o mundo a energia é transferida, não como uma corrente contínua, mas como uma corrente que varia senoidalmente com o tempo (corrente alternada, ou CA). O desafio dos cientistas e engenheiros é projetar sistemas que transfiram a energia de forma eficiente e construir aparelhos capazes de utilizar essa energia. (HALLIDAY, 2009 pg. 305)

Esta discussão, que ficou conhecida como "guerra das correntes", certamente não se restringiu a argumentos técnicos ou científicos e, principalmente a partir de 1891, Thomas Edison "baixa o nível" da discussão, eletrocutando animais para provar, supostamente, os malefícios e perigos da corrente alternada (MONTICELLI; GARCIA, 2003 pg. 15). A sociedade da época foi inundada com altas porções de alarmismo, cujas doses incluíram até mesmo a eletrocussão pública de um elefante em 1903, registrada em vídeo pela empresa de Edison para posterior divulgação (IMDB, 1903). De forma análoga, pode-se observar que mesmo as recentes discussões acerca da definição das matrizes de geração de energia elétrica trazem também, de ambos os lados, argumentos que ultrapassam o limite da razão e por vezes adentram ao campo da poesia ou do ataque pessoal.

Tome-se, apenas a título de exemplo (por este motivo os cálculos a seguir não serão relacionados na parte de metodologia ou resultados), algumas comparações possíveis em relação a situação do atual conflito entre os empreiteiros da obra da usina de Belo Monte e os movimentos sociais que querem a proteção do meio ambiente ou de comunidades em risco. Um aspecto muito discutido é o da área ocupada pela tecnologia atualmente escolhida. O aproveitamento de área para geração de energia elétrica relativo à Usina de Belo Monte foi estimado em torno de 21,8 MW/km² (ANA, 2009), que é um valor alto em comparação a diversas outras usinas em operação, e

poderia, de certa forma, ser comparado com o aproveitamento de soluções fotovoltaicas, como, por exemplo, o aproveitamento do *Agua Caliente Solar Project* cuja potência instalada final será de 290 MWp e cuja área de instalação é estimada em 2400 acres (cerca de 10 km²), resultando, portanto, em um aproveitamento de cerca de 29 MW/km² (FIRST SOLAR, 2012). Desta forma leva-se a entender que a solução fotovoltaica é mais interessante no quesito área utilizada.

No entanto, um dos aspectos mais importantes nessa comparação, principalmente em relação à operação do sistema, é se levantar a quantidade de "energia firme" disponível pelas diferentes opções de geração de energia elétrica. Energia Firme pode ser entendida como o maior valor possível de energia capaz de ser suprido continuamente pelo sistema sem ocorrência de déficits, considerando constantes sua configuração e as características de mercado, no caso de repetição das afluições do registro histórico (ONS, 2009), sendo, portanto, o volume de energia gerado por uma "potência média" caso esta geração de energia fosse ininterrupta. Fator de capacidade pode ser entendido como a proporção entre a produção efetiva da usina em um período de tempo e a capacidade total máxima neste mesmo período (ONS, 2009). A energia firme pode ser estimada, portanto, multiplicando-se a potência instalada pelo fator de capacidade e integrando-se esta potência ao longo do tempo. Assim, como se considera uma potência constante (vide definição acima), a energia firme pode ser dada por:

$$E_f = P_i \times F_c \times \Delta t$$

Onde:

E_f = Energia firme

P_i = Potência instalada

F_c = Fator de capacidade

Δt = período de tempo

Portanto, quando levado em consideração o fator de capacidade de cada opção, que é a proporção entre a produção efetiva da usina em um período de tempo e a capacidade total máxima neste mesmo período, que é de cerca de 40% (ANA, 2009) para Belo Monte e de 14,4% a 16,2% (EPE, 2012 pg. 29) para sistemas de geração fotovoltaicos no Brasil (usou-se, para efeito de cálculo, a média aritmética de 15,3%), tem-se 8,72 MW/km² e 4,44 MW/km² para Belo Monte e *Agua Caliente Solar Project*, respectivamente, induzindo-se desta vez, a se pensar que a solução fotovoltaica é menos interessante no quesito área utilizada.

Em relação ao custo, de forma análoga, seria possível realizar comparações de várias formas (BRAZILIAN et al, 2013 pg. 2). Como exemplo, tome-se a tabela a seguir, que compara a potência instalada, o fator de capacidade e a potência média firme (relativa a energia firme) da usina de Belo Monte (ANA, 2009), partindo-se da mesma potência instalada, com a geração fotovoltaica distribuída, utilizando-se, para tanto, a média aritmética (15,3%) do fator de capacidade médio para sistemas de geração fotovoltaicos no Brasil, que é de 14,4% a 16,2% (EPE, 2012 pg. 29) para chegar aos 1718,6MW da tabela a seguir.

Posto que o custo considerado para a implantação da usina de Belo Monte é de 30 bilhões de reais (PEREIRA, 2013), e a este soma-se o custo do seu suporte para transmissão de energia, estimado em 4 bilhões de reais para Belo Monte (CRAIDE, 2012), resultando num custo total de 34 bilhões de reais. O custo de transmissão de energia foi desconsiderado para o sistema distribuído, posto que o mesmo pressupõe não existir necessidade de sistemas de transmissão (pela própria definição do tipo de sistema). Considera-se para o custo por Watt instalado para o sistema fotovoltaico distribuído, já com isenção de impostos, o valor de R\$ 6,31/Wp (EPE, 2012 pg. 27), chegando-se ao custo total de 70,9 bilhões de Reais para a instalação dos mesmos 11233W de potência instalada sob forma de painéis fotovoltaicos, o que poderia induzir a conclusão de que o custo da energia fotovoltaica é aproximadamente duas vezes maior (R\$6,31/W contra R\$3,03/W).

No entanto, esta conclusão se mostra equivocada quando considera-se os fatores capacidade, de 15,3% para a solução fotovoltaica e de 40% para Belo Monte, afinal, desta forma chega-se a valores de R\$ 7,57 e R\$ 41,24, respectivamente, para os custos por Watt de potência média ininterrupta (energia firme) para os sistemas hidráulico (Belo Monte) e fotovoltaico (modalidade distribuída).

A Tabela 1 resume esta comparação entre Belo Monte e o sistema fotovoltaico, partindo-se da mesma potência instalada e do fator de capacidade para se calcular a energia firme, e então, a partir dos custos de implantação do sistema e transmissão de energia (zero no caso da modalidade fotovoltaica distribuída), calcular os custos por Watt de potência instalada ou por Watt de potência média ininterrupta (relacionada à energia firme).

Tabela 1 - Comparação dos custos por Watt de potência média ininterrupta (energia firme) para os sistemas hidráulico (Belo Monte) e fotovoltaico (modalidade distribuída) (fonte: Autor)

Descrição	Belo Monte		Fotovoltaica distribuída	Unidade
Potência total instalada	11233	11233		MW
Fator de capacidade	40,0%	15,3%		%
Potência média ininterrupta (energia firme)	4493,2	1718,6		MW
Total de investimento em geração	30	70,9		R\$ bilhões
Investimento em transmissão de energia	4	0		R\$ bilhões
Custo por Watt de potência instalada	R\$ 3,03	R\$ 6,31		R\$/W
Custo por Watt de Potência média ininterrupta (energia firme)	R\$ 7,57	R\$ 41,24		R\$/W

Estas comparações são tomadas apenas a título de exemplo, no intuito de mostrar como é possível se ter uma grande quantidade de combinações de variáveis diferentes para diferentes comparações. Tem-se, portanto, a possibilidade de se gerar uma grande diversidade de conclusões equivocadas ou precipitadas. No exemplo apresentado, obviamente, no que tange à operação do sistema haveria de se considerar vários outros aspectos ao mesmo tempo, já que, por exemplo, a energia solar fotovoltaica não pode suprir a demanda de consumo noturno, já que depende do sol para seu funcionamento.

No decorrer do trabalho serão apresentadas outras formas de comparação econômica de custo de energia, como o custo nivelado da energia, que levam mais variáveis em consideração, e, portanto, tendem a ser mais plausíveis para a comparação.

Observa-se, assim, que a própria história do uso e desenvolvimento da energia elétrica é permeada de conflitos, os quais, mesmo que em novos formatos, persistem até os dias de hoje, e que a grande quantidade e diversidade de fatores a serem avaliados pode dificultar a comparação de diferentes formas de geração energia, levando muitas vezes a disparidades de informações.

2.2 Eficiência energética

A dificuldade na comparação de diferentes matrizes energéticas fica ainda mais evidente quando se incluem na análise outras variáveis, também elencadas por diversos movimentos sociais, tais quais a taxa de emissão de gases de efeito estufa, a entropia relativa aos processos de conversão, as perdas de biodiversidades decorrentes da instalação, os custos da obra, as perdas de transmissão, e principalmente os agentes sociais envolvidos na construção, na operação e no consumo da energia elétrica gerada.

O estudo da eficiência energética torna-se, portanto, dadas as perspectivas mundiais de demanda de energia, um assunto de suma importância. Na física, a eficiência energética é a capacidade de se produzir o mesmo trabalho utilizando menos energia, ou então produzir mais trabalho utilizando a mesma quantidade de energia. No entanto, em um contexto interdisciplinar há diversas outras variáveis a serem agregadas, o que certamente torna o cenário mais complexo.

Assim, tendo em vista que comparações relativas a eficiência de diferentes sistemas precisam levar em conta um cenário interdisciplinar, faz-se necessário considerar diversos aspectos, tais quais tecnológicos, legais, sociais ou ambientais. Tem-se ainda que diferentes realidades sociais e culturais ao redor do globo refletem diferentes realidades de produção, distribuição e consumo de energia, sendo, portanto, necessárias análises cada vez mais criteriosas a respeito do tema.

Percebe-se o crescimento do interesse em se quantificar tais aspectos alternativos, e termos como "custo social da energia" estão se tornando comuns em publicações, o que mostra que estas ideias estão começando a aparecer (LORENZO, 1994 pg. 53).

Corroboram com esta visão interdisciplinar estudos encontrados na literatura que tratam, por exemplo, do conceito de energia embutida nos mais diversos bens de consumo. Neste sentido destaca-se, por exemplo a energia embutida em insumos de construção civil, como observado pelo professor Sérgio Fernando Tavares (TAVARES, 2006), que concluiu que o consumo de energia no setor residencial é relevante não só em termos de eletricidade, afinal, embora tenha havido um crescimento significativo de uso de energia elétrica nos últimos anos, este não é o principal insumo energético no ciclo de vida das edificações residenciais, nem mesmo na fase operacional, caso seja avaliada a energia embutida nos materiais de construção.

“Eficiência energética é normalmente vista como uma opção de recurso, como o carvão, o óleo ou o gás natural. Porém, em contraste com estas opções, a eficiência energética pressiona

para baixo os preços de energia por reduzir a demanda ao invés de aumentar a oferta. Como resultado, a eficiência energética pode reduzir o uso de recursos e os efeitos sobre o meio ambiente.” (SISSINE, 2002).

A questão da eficiência energética pode, assim, ser vista como um fenômeno complexo. Seus aspectos legais, de engenharia, políticos, culturais, sociais e econômicos fundem-se, sendo muitas vezes causas e efeitos uns dos outros.

Por vezes as próprias ações que supostamente levariam a um aumento de eficiência energética e conseqüentemente a uma redução do consumo de energia, acabam por causar, na realidade, um aumento no consumo desta mesma energia, como descrito pela primeira vez em 1865 por Stanley Jevons, que percebeu que o aumento da eficiência de um motor a vapor causou, num primeiro momento, a diminuição do consumo de carvão, e, conseqüentemente, a baixa nos preços do carvão. Entretanto, ele também percebeu que tal fato permitiu mais pessoas a terem acesso ao carvão para novos usos, o que acabou por aumentar significativamente seu consumo. Este fenômeno foi batizado como “*Rebound Effect*” (efeito rebote) (JEVONS, 1865). Fenômenos como este elevam a importância de realizar estudos aprofundados sobre o tema da eficiência energética e as trajetórias para obtê-la.

Assim como o motor à vapor causou, indiretamente, o aumento no consumo de carvão, seria possível uma comparação com o atual sistema de geração de energia elétrica no Brasil, que, quando analisados exclusivamente aspectos de eficiência, pode se mostrar pouco coerente. Afinal, muito embora o país tenha o privilégio de um alto nível de radiação solar (conforme será demonstrado no item 4.1), sua principal tecnologia de geração de energia elétrica é ainda fortemente baseada em grandes obras de usinas hidroelétricas e a parcela da geração solar é muito pequena (vide Figura 3 - Oferta interna total de energia elétrica em 2012 no Brasil).

E mesmo que críticas contundentes tenham sido levantadas em relação a tais obras, houve pouco aumento na participação de tecnologias mais eficientes (vide Figura 3 - Oferta interna total de energia elétrica em 2012 no Brasil), já desenvolvidas e amplamente testadas e adotadas em outros países.

Assim, percebe-se que algumas tecnologias não são amplamente adotadas mesmo quando algumas vantagens ambientais, técnicas e de eficiência energética se mostram claras, tal qual o exemplo do sistema de geração fotovoltaica distribuída (conforme será demonstrado no decorrer do trabalho). Eficiência termodinâmica ou benefícios ambientais, portanto, não parecem ser os fatores mais importantes na escolha do método de geração de energia elétrica.

Neste sentido, observa-se que mais de cem anos após os escritos de Jevons, o tema da eficiência ainda permanece relativamente obscuro. Especialmente quando é alvo de objetivos de políticas públicas para sua promoção. Segundo BERMMAN (2010) “estudos mostraram que Balbina, Tucuruí e Samuel, as três maiores hidrelétricas construídas na região amazônica até agora, emitem gases de efeito estufa mais ou na mesma proporção que usinas a carvão mineral. Isso pode parecer uma surpresa, mas nos primeiros dez anos de operação de uma usina da Amazônia, a matéria orgânica, a mata, ela apodrece porque a água a deixa encoberta permanentemente. E o processo de apodrecimento é muito forte, acidifica a água e emite metano, que é um gás 21 vezes mais poluente que o gás carbônico, principal gás do efeito estufa. Isso é conhecido pela ciência, mas não é considerado porque não é de interesse de quem concebe essas usinas. O que interessa é a grande quantidade de dinheiro que vai ser repassado para as empresas construtoras de barragens, turbinas e geradores. O restante, o problema ambiental, as populações que serão expulsas, a cultura indígena que está sendo desconsiderada, isso não entra na conta.” (BERMANN, 2010)

No resto do mundo a situação não se mostra diferente, conforme pode ser visto na Figura 1, que mostra o Consumo total mundial de energia (em milhões de toneladas de petróleo) ao longo do tempo (de 1985 a 2012).

Percebe-se um claro aumento na contribuição de métodos de geração notoriamente poluidores e de baixa eficiência termodinâmica. Assim, pode-se supor que outras justificativas, que não a eficiência termodinâmica, por exemplo, têm sido adotadas para a escolha dos métodos de conversão de energia.

Neste sentido, a tendência de "especialização" do saber científico trouxe consigo, nos mais diversos campos, novas variáveis a serem avaliadas, cujas relevâncias variam rapidamente de acordo com a condução das novas pesquisas, mas que geralmente possibilitam toda sorte de análise e as mais variadas conclusões, de acordo com os objetivos de cada especialidade, abrindo, assim, portas para interpretações tendenciosas, válidas apenas em contextos muito específicos. Nesse sentido, afirma Morin (2003), sobre o conhecimento científico atual:

Esta é uma ciência cuja matematização e formalização são cada vez mais rigorosas e sofisticadas; mas essas qualidades contêm o defeito de uma abstração que se separa do contexto (social, cultural, político); ela conquista sua precisão formal esquecendo a complexidade de sua situação real (...)

Como exemplo, poder-se-ia comparar atributos das diversas opções de matrizes de geração de energia elétrica sob diferentes focos de análise, de acordo com os filtros de análise de cada modalidade de movimento social, obtendo-se assim as mais variadas conclusões. Conclusões estas, que surgem, com o avanço dos meios de disseminação da informação, cada dia de forma mais rápida. A respeito do assunto, esclarece Melluci, (1995):

A realidade em que vivemos se tornou, em sua totalidade, uma construção social, e nossas representações desta realidade servem como filtros para o nosso relacionamento com o mundo. Pela primeira vez na história da espécie humana, isso também é verdade de forma literal. De fato, o mundo do qual falamos hoje é um mundo global de escala planetária, e isso foi possível somente pela informação, ou seja, pelos processos culturais com os quais nós representamos nosso mundo para nós mesmos.

Desta forma, dentro deste relacionamento intenso com o mundo, se torna difícil ao consumidor final de energia elétrica interpretar quais fontes de energia seriam a melhor escolha em relação a suas concepções ideológicas. Cabe ressaltar que a liberdade de escolha ao pequeno consumidor e energia elétrica em relação a métodos alternativos de geração de energia elétrica é, como será visto no decorrer do trabalho, uma das características principais do sistema de micro geração fotovoltaica distribuída.

Em relação a esta escolha, Capra (1996) apresenta que o chamado mercado livre (capitalista) não fornece aos consumidores informações adequadas, pois os custos sociais e ambientais de produção não participam dos atuais modelos econômicos. Esses custos são rotulados de variáveis "externas" pelos economistas do governo e das corporações, pois não se encaixam nos seus arcabouços teóricos. Os economistas corporativos tratam como bens gratuitos não somente o ar, a água e o solo, mas também a delicada teia das relações sociais, que é seriamente afetada pela expansão econômica contínua. Os lucros privados estão sendo obtidos com os custos públicos em detrimento do meio ambiente e da qualidade geral da vida, e às expensas das gerações futuras. O mercado, simplesmente, nos dá a informação incompleta. Há uma falta de realimentação, e a alfabetização ecológica básica nos ensina que esse sistema não é sustentável (CAPRA, 1996).

Assim, posta a atual perspectiva de demanda de energia em relação aos limites dos recursos ambientais locais (SILVA, 2012 pg. 21 ; MOREIRA, 2012 pg. 23) a tendência é de que o tema da eficiência energética seja discutido, e que muitos dos processos atuais de geração e conversão de energia sejam questionados (REY, 2012, pg. 44) para, no futuro, darem vez a usos mais sábios da energia, eliminando desperdícios óbvios, de forma a aumentar a eficiência de conversões com ações tais quais: substituir produtos por outros com menor energia embutida; criar processos de conversão mais eficientes; fazer uso da reciclagem; ter modos de vida mais modestos em relação ao consumo de energia (LIOR, 2010, pg. 2637).

Observa-se assim que, muito embora ao longo do tempo os aspectos ambientais tenham ganho peso nos processos de tomada de decisão (LORENZO, 1994 pg. 53), ainda persistem situações em que a multiplicidade de fatores envolvidos torna o ramo da geração de energia elétrica um cenário complexo, no qual muitas vezes os custos sociais e ambientais da produção não são considerados (BERMANN, 2012 pg. 19) de forma a possibilitar tomadas de decisões a partir de informações incompletas (MOREIRA, 2012 pg. 25).

Portanto, pode-se apontar que, haja vista um cenário de recursos limitados, temas como eficiência energética de diferentes processos terão cada vez importância na condução da humanidade a um caminho sustentável em relação a sua produção e seu consumo de energia.

2.3 Potencial de geração solar no mundo

Tão importante quanto estabelecer a noção de eficiência energética é apresentar as fontes de energia utilizadas e seus aspectos ambientais e regulatórios. Nesse aspecto

“o sol forneceu energia ao planeta por bilhões de anos, e praticamente todas as nossas fontes de energia (...) têm sua origem na energia solar. Entretanto, nem todas essas fontes (derivadas) de energias são renováveis. Nos debates atuais sobre energia, o termo energia solar é usado para designar as formas de energia provindas de fontes inesgotáveis ou renováveis (...).As tecnologias solares mais eficientes são os aparelhos de pequena escala usados por comunidades locais, que geram uma grande variedade de empregos. Assim, o uso da energia solar, como todos os outros princípios do projeto ecológico, reduz a poluição e aumenta a taxa de emprego. Além disso, a transição para o uso da energia solar beneficiará especialmente os habitantes do Hemisfério Sul, onde a luz do Sol é mais abundante” (CAPRA, 2002).

Bjorn Lomborg ilustra a situação com uma figura (Figura 4) que compara a intensidade da energia solar recebida em um ano com os estoques totais de energia em forma de petróleo, gás, urânio e carvão (LOMBORG, 2006), conforme pode ser visto a seguir. Haja vista que a figura compara os estoques totais mundiais de cada recurso com o consumo mundial anual total de energia, e por fim com que a energia solar total incidente, cabe a ressalva de que apenas uma parte desta última poderia ser convertida em energia elétrica consumível, posto que vários outros processos naturais essenciais também se utilizam desta, como os ventos ou a fotossíntese (vide Figura 4).

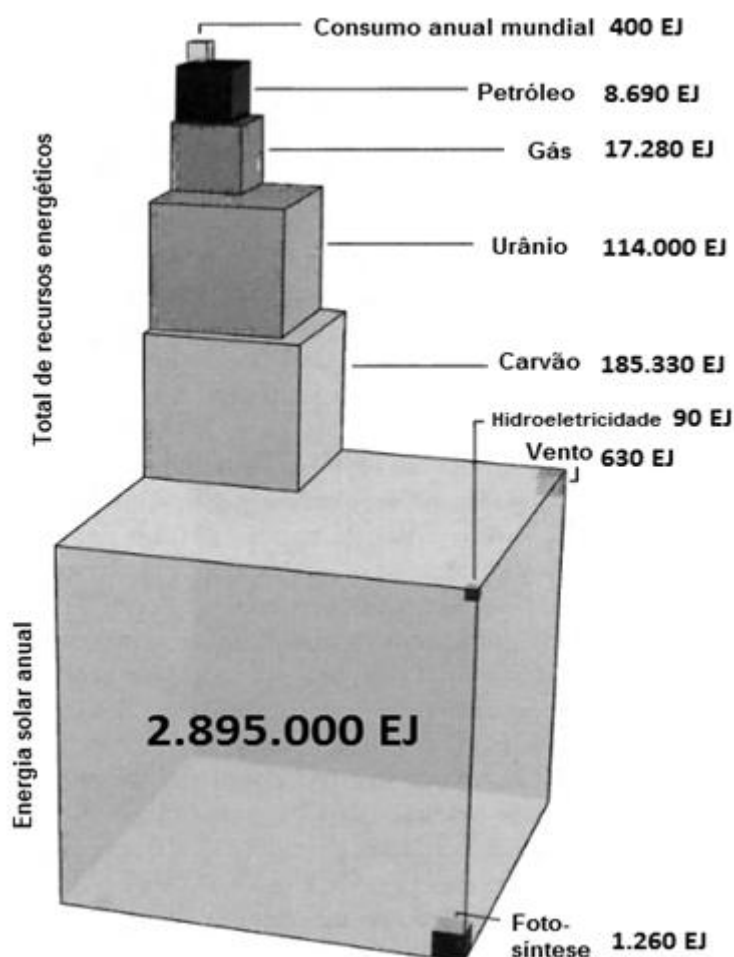


Figura 4 - Comparação de radiação solar anual com os estoques mundiais totais de energia não renovável, para comparação da ordem de magnitude Fonte: LOMBORG, 2006.

Tendo como pressuposto que a energia presente no universo seja, segundo Lavoisier, finita, a principal dificuldade é a de controlar suas diversas fontes de conversão, a fim de transformar de forma economicamente viável a energia primária em formas utilizáveis. É justamente este o papel dos conversores biológicos, como as espécies selecionadas pelos agricultores, ou então dos conversores artificiais, como as rodas d'água, as máquinas a vapor, as hidroelétricas ou mesmo as centrais nucleares. Portanto, observa-se que o bom rendimento destes conversores permite liberar um excedente energético para outras funções além daquelas de manutenção e de simples reprodução de um dado sistema. Assim, em qualquer sociedade humana o problema energético é mais comumente um problema de obtenção de bons e eficientes conversores do que de fontes de energia (GOLDEMBERG, 1987).

A energia elétrica tem características que a tornam única e lhe dão grande vantagens únicas, principalmente no que tange a sua conversibilidade em outras formas de energia (mecânica, térmica, luminosa, etc.) com grande eficiência termodinâmica e às facilidades de transporte de energia. Observa-se, ainda, que a energia solar representa um grande potencial de geração elétrica pelo uso do fenômeno fotovoltaico (cujos detalhes são tratados em capítulo a parte) em sistemas de geração distribuída. Assim, torna-se oportuno definir o conceito de geração distribuída:

A geração distribuída se refere a unidades de produção de eletricidade de tamanho reduzido localizadas ao longo do sistema de distribuição com o objetivo de atender demandas localizadas (...) durante períodos de pico ou então postergando a necessidade de novas instalações ou expansão das existentes (JANUZZI, 2000, p. 57).

Ao contrário do que costuma acontecer com a maioria dos sistemas de conversão de energia, o tamanho reduzido dos sistemas de geração distribuída não os inviabilizam, em vista do fato de que estes sistemas não se prestam para sustentar todo o sistema elétrico interligado, como é o caso da geração concentrada, mas apenas para satisfazer a pequena demanda local dos

consumidores domésticos. Esta característica a torna viável conforme a lógica de SCHUMACHER (1977), que afirma que sistemas pequenos possuem vantagens em relação a grandes sistemas centralizados. Afinal, no caso da geração distribuída não são necessários investimentos em transmissão para levar a energia do local da geração concentrada até o consumidor.

Em relação às tecnologias de alternativas energéticas que são consideradas mais apropriadas para a geração distribuída estão em a biomassa e a fotovoltaica (JANUZZI, 2000, p. 57). Não é à toa, portanto, que a Itaipu desenvolveu o programa de geração de energia a partir da biomassa consumida nos biodigestores (PTI, 2014) e poderia, assim, avançar também com programas de apoio à geração de energia a partir da fonte solar fotovoltaica. As Nações Unidas declararam 2012 como o Ano Internacional da Energia Sustentável e identificaram a falta de segurança normativa para os investimentos nessa área como um dos principais problemas que devem ser vencidos (UNITED NATIONS, 2014).

Observa-se, portanto, que a energia disponível à humanidade é, em essência, de origem solar e que a grande questão é a forma como esta energia é convertida em outras formas, tais quais mecânica, térmica, luminosa, elétrica, etc. Neste sentido, a energia elétrica possui grandes vantagens de convertibilidade em relação às demais, e a energia fotovoltaica se mostra extremamente apropriada no que tange a aspectos de eficiência energética, e, conseqüentemente, ambientais.

2.4 Tecnologia fotovoltaica

O fenômeno fotovoltaico foi primeiramente observado em 1839 pelo físico experimental francês Edmund Becquerel, que percebeu, durante experiências com células eletrolíticas de metais diferentes, que alguns materiais produziam pequenas quantidades de corrente elétrica quando expostos à luz (KNIER, 2002). No entanto, a produção substancial de painéis

fotovoltaicos comerciais surgiu somente da década de 1970, durante a crise de energia (KNIER, 2002).

Cabe lembrar a grande contribuição do cientista Albert Einstein no modelamento físico da geração fotovoltaica em seu artigo de 1905, chamado *"On a Heuristic Viewpoint Concerning the Production and Transformation of Light"*, que inclusive lhe rendeu um prêmio Nobel de Física em 1921. Em seu artigo, inspirado em trabalhos anteriores de Max Planck, Einstein propõe (EINSTEIN, 1905) que a energia luminosa pode ser absorvida ou emitida apenas sob quantidades discretas, chamadas de "quanta". Einstein afirma que a energia, durante a propagação de um raio de luz, não é distribuída continuamente ao longo de um aumento constante dos espaços, mas consiste num número finito de "quanta" de energia em pontos no espaço que movem-se sem dividirem-se e são capazes de serem absorvidos ou gerados somente sob forma destas entidades discretas (chamadas quanta). Esta pesquisa foi fundamental para o desenvolvimento dos atuais módulos fotovoltaicos.

Como pode ser observado na figura 5, o fenômeno fotovoltaico ocorre quando dois tipos de semicondutores diferentes, um dopado negativamente (do tipo N) e outro dopado positivamente (do tipo P) são unidos em diferentes camadas, e a cada fóton de luz absorvido pela camada superior, um elétron é movido para a outra camada, de forma a criar uma corrente elétrica de corrente contínua (SURYA URZA ENTERPRISES, 2014). Conforme será discutido ao decorrer do trabalho, cabe ressaltar, que, para possibilitar a injeção da energia gerada na rede elétrica (que usa corrente alternada), se faz necessário converter o sinal de corrente contínua para corrente alternada, e o equipamento utilizado para tanto é o inversor.

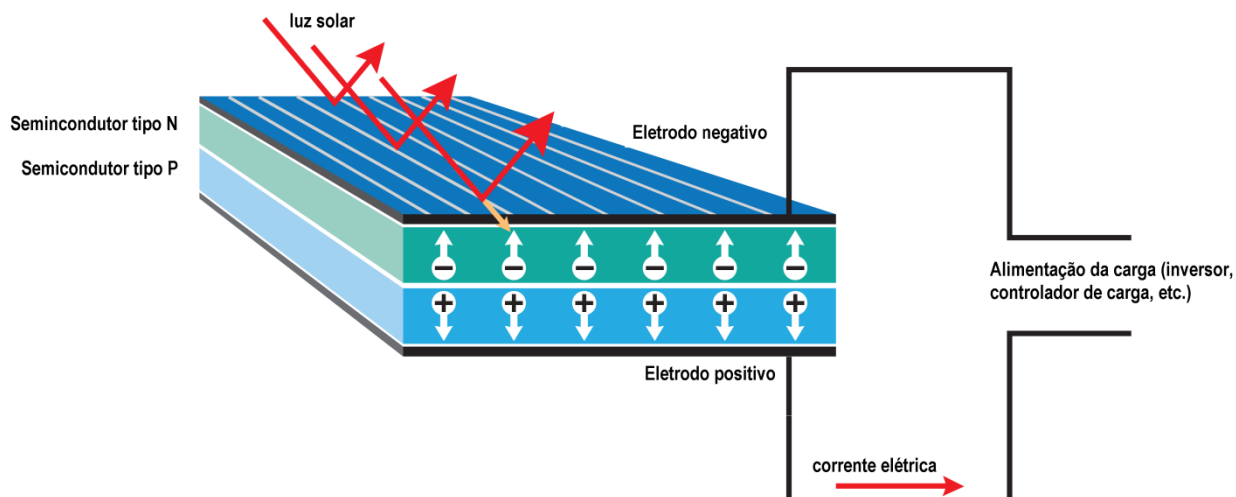


Figura 5 - Esquema representando geração de corrente elétrica através do fenômeno fotovoltaico. Fonte: SURYA URZA ENTERPRISES, 2014

A geração fotovoltaica faz uso de elementos semicondutores fotossensíveis que convertem a radiação solar em uma diferença de potencial nos terminais da junção P-N. A ligação elétrica desses terminais resulta na circulação de corrente contínua. Uma única célula solar produz, em condições nominais de teste, diferença de potencial entre 0,5 e 0,6V e potência entre 1,0 e 1,5W, de modo que, para uso prático, as células devem ser arranjadas em ligações série-paralelo constituindo módulos (painéis) de baixa potência, atualmente de até 250W, com tensão de 12 ou 24V. O arranjo série-paralelo de módulos permite o atendimento a cargas maiores. (EPE, 2012 pg. 3)

Vários destes conjuntos de células fotovoltaicas são unidas em série, de forma a se criar uma diferença de potencial elétrico (tensão) substancialmente grande para, mesmo com pequenas áreas disponíveis, suprir as especificações dos inversores comerciais. Os painéis fotovoltaicos são, portanto, a união de várias células fotovoltaicas e podem, da mesma forma, ser associados em série ou em paralelo quando necessário a cada projeto, sendo observável, portanto vantagens em relação a outros dispositivos de conversão: A característica de modularidade cria vantagens na cadeia logística (DAVIES; JOGLEKAR, 2010 pg. 7), e os sistemas

tornam-se tecnicamente viáveis mesmo para sistemas geradores de pequenos montantes de energia (EPE, 2012 pg. 48), que podem ser facilmente expandidos para aumento da potência instalada (DAVIES; JOGLEKAR, 2010 pg. 6).

As principais tecnologias disponíveis comercialmente e, portanto, utilizadas mais substancialmente para a geração fotovoltaica, são, em ordem de importância:

- Painéis de silício cristalino: Representam a maior parte da produção de energia fotovoltaica no mundo, e podem ser de silício policristalino (primeira geração de painéis) ou de silício monocristalino (que exigem maior pureza do silício para a produção, usados na segunda geração de painéis). A eficiência destes modelos gira entre 11 a 19% (EPE 2012 pg. 7).
- Filmes finos de silício amorfo ou outros materiais: Têm eficiências menores em relação ao silício cristalino (cerca de 4% a 8% para silício amorfo, material utilizado na maioria dos módulos desta categoria), porém são produzidos com materiais maleáveis, permitindo a utilização de superfícies curvas para a geração de energia fotovoltaica, além de não serem tão afetadas por altas temperaturas (EPE 2012 pg. 6 - 7).
- Outras tecnologias possuem menor representatividade no parque instalado, e em entre estas, destacam-se: a utilização de materiais orgânicos, muito embora neste caso os módulos apresentem baixas eficiências e alta degradação ao longo do tempo (FORREST, 2005); ou então outros materiais alternativos, como o Arsenieto de gálio (GaAs), que chega a 35% (NASA, 2002) de eficiência, que, entretanto, só se mostra viável para aplicações específicas, tais aero-espaciais ou de pesquisa, devido aos materiais e processos produtivos utilizados. (LIMA, 2012 pg. 15)



Figura 6 - Principais tipos de módulos fotovoltaicos comerciais utilizados atualmente. Fonte: Knoji Consumer knowledge, 2014

Algumas destas células fotovoltaicas de materiais alternativos e alta eficiência merecem destaque. Muito embora as células fotovoltaicas convencionais sejam fabricadas à base de silício, alguns modelos de filmes finos usam gálio, índio e telúrio. As células à base de silício responderam por cerca de 90% da oferta global em 2011, no entanto, as células de filme fino apresentam vantagens em relação às células à base de silício, já que requerem menos material funcional, e podem ser fabricadas em rolos ou folhas contínuas e depositadas sobre substratos flexíveis. Dentre estas, duas tecnologias de filme fino são consideradas estratégicas: cádmio-telúrio (CdTe) e diselenieto de cobre, índio e gálio (CIGS). A tecnologia CIGS responde por apenas 1% do mercado. Apesar de a tecnologia CdTe estar mais consolidada, não tem

perspectivas tão boas quanto a tecnologia CIGS, já que pesquisas realizadas na Alemanha atingiram uma eficiência recorde de 20,3% com a tecnologia CIGS. (LIMA, 2012 pg. 15)

O valor de mercado de materiais como diselenieto de cobre, índio e gálio (CIGS), foi estimado em US\$ 613 milhões, em 2011, e pode chegar a US\$ 5,4 bilhões, em 2018. No entanto, a tecnologia CIGS demora a entrar no mercado comercial devido à complexidade do processo de fabricação e à redução dos preços das células solares a base de silício. Tais fatores resultaram em uma superoferta de módulo CIGS, o que causou uma redução de 20% nos preços de mercado. (LIMA, 2012 pg. 16)

Apesar do aumento da demanda de energia elétrica a partir da energia solar, ainda não houve um aumento significativo na demanda de Telúrio, pois as células de silício cristalino ainda respondem pela maior parte do mercado global. Contudo, a fatia de mercado das células de filme fino deve crescer. (LIMA, 2012 pg. 34)

Em relação ao potencial poluidor da produção e utilização destas células fotovoltaicas alternativas, já que as mesmas requerem elementos tóxicos na produção, tem-se que as mesmas ainda apresentariam resultados extremamente satisfatórios se comparadas aos atuais métodos de geração de energia, baseados principalmente em combustão. Sobre este tema, um estudo chamado "*Integrated life-cycle assessment of electricity-supply scenarios confirms global environmental benefit of low-carbon technologies*" conclui que a implementação de fontes alternativas de energia combinadas, tais quais fotovoltaica, eólica, etc., têm grande potencial de redução dos impactos da poluição relativos à produção de eletricidade, mesmo considerando-se um cenário em que estas fatias de mercado (células de CdTe e CIGS) sejam crescentes em relação ao sistema de produção total. (HERTWICH et al, 2013)

Cabe ressaltar ainda que novos formatos de sistemas fotovoltaicos, alternativos ao painel fotovoltaico de silício cristalino comum começam a surgir em novas concepções de produto, como, por exemplo, os elementos fotovoltaicos integrados a edifícios (em inglês, *Building Integrated*

Photovoltaics, ou BIPV), já que esta tecnologia, além das vantagens já mencionadas, permite ainda fabricação de módulos fotovoltaicos nos mais variados formatos construtivos (PRASAD; SNOW, 2005 pg. 9), como, por exemplo, sob forma de telhas (como o exemplo da figura 7), ou de coberturas semi-transparente, ou de paredes externas, etc., o que permitirá, aos edifícios de um futuro próximo, gerarem a própria energia através dos próprios elementos construtivos do edifício, sem que haja a necessidade de anexar novos elementos geradores sob os telhados, que podem ter áreas restritas de acordo com os detalhes de cada projeto (PRASAD; SNOW, 2005 pg. 11).



Figura 7 - Telha fotovoltaica. Fonte: SOLBRAVO S/A, 2012

Observa-se, portanto, que a tecnologia fotovoltaica, que é chamada de "tecnologia de estado sólido" por transformar a energia luminosa diretamente em energia elétrica sem usar partes móveis, muito embora trate-se de uma descoberta no século dezenove (KNIER, 2002), foi comercialmente viabilizada mais recentemente, e atualmente é utilizada quase que na totalidade da geração mundial sob a forma de silício cristalino (EPE, 2012 pg. 7), muito embora outras tecnologias venham surgindo, assim como formas alternativas de design, tais quais os elementos fotovoltaicos integrados a edifícios (PRASAD; SNOW, 2005 pg. 9).

2.5 Mini e Micro Geração distribuída

No Brasil, a geração, transmissão e distribuição de energia elétrica são serviços públicos regulados por uma autarquia federal, a Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL, cuja competência tem fundamento no art. 21, XII, alínea “b” da Constituição da República de 1988 e na Lei Federal nº 9427 de 1996. A ANEEL é, portanto, competente não só para fiscalizar como também para regulamentar, isto é, para detalhar a forma como esses serviços públicos serão prestados. E, no exercício do seu poder regulatório, editou a Resolução nº 167/2005, a qual foi uma primeira tentativa de organizar a geração distribuída (ANEEL, 2005) mas que talvez não tenha proporcionado a segurança normativa necessária para que se ampliasse em larga escala a produção dos pequenos geradores domésticos.

A ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica) abriu uma audiência pública para coletar mais sugestões sobre a energia distribuída e sua regulação no Brasil, que resultou na Nota Técnica nº 4/2011 (ANEEL, 2011). Essa Nota técnica subsidiou o debate que se seguiu e que embasou uma nova norma regulamentar: a Resolução nº 482 de 2012 (ANEEL, 2012), a qual pode ser chamada de marco regulatório da microgeração e minigeração distribuída no Brasil. Com base nessa norma, os consumidores domésticos, ligados à rede de distribuição, também podem gerar sua própria energia elétrica por meio de fontes alternativas.

Essa produção doméstica, já gerada de forma "distribuída", pode ser licitamente injetada na rede de distribuição conforme regras técnicas que foram elaboradas pelas distribuidoras, sendo o consumidor compensado pela energia injetada na rede, de forma a tornar desnecessário o uso de sistemas de armazenamento de energia, tais quais baterias, que, no caso da bateria chumbo-ácido, são equipamentos onerosos, pouco eficientes (CRESESB, 2004 pg. 64) e de difícil descarte devido a sua composição, que inclui metais pesados como o chumbo (CRESESB, 2004 pg. 60 - 61). Mas há limites, posto que o consumidor não poderá ser remunerado monetariamente pela

distribuidora, diferentemente do que ocorreu em outros países como a Espanha e a Alemanha, por meio de tarifas *feed-in* (JANUZZI, 2000), que faz com que as distribuidoras paguem mais para o consumidor pela energia gerada de forma alternativa do que o mesmo consumidor paga pela energia recebida da rede elétrica, gerada, principalmente (no caso da Europa) a partir de combustíveis fósseis.

Em comparação à geração fotovoltaica que usa baterias, a geração de energia elétrica fotovoltaica na modalidade distribuída é, atualmente, a forma mais comum e a que tem o maior crescimento no mundo, tendo ultrapassado já na década de 1990 a potência total instalada em sistemas isolados, como pode-se perceber pela figura 8, retirada do relatório da Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2012 pg. 35) intitulado "Análise da Inserção da Geração Solar na Matriz Elétrica Brasileira", que retrata o aumento mundial na utilização dos sistemas fotovoltaicos integrados à rede. Enquanto a figura 9 mostra o aumento da potência instalada total (em MWp), o segundo mostra a proporção (em percentual) entre os sistemas "conectados na rede" e "isolados". Assim, ficam evidentes tanto o aumento da utilização da geração de energia fotovoltaica, quanto a adoção em massa dos sistemas distribuídos.

Cabe ressaltar ainda que, mesmo em um cenário mundial de crescimento a médio e longo prazo, recentemente várias empresas do ramo passaram por dificuldades, sendo o pedido de falência da gigante SUNTECH (GOOSSENS; DOOM, 2013) (BLOOMBERG, 2103) um dos marcos desta recente crise. No Brasil, as vendas destes equipamentos no Brasil ainda não se mostram substanciais. (GARCIA, 2013)

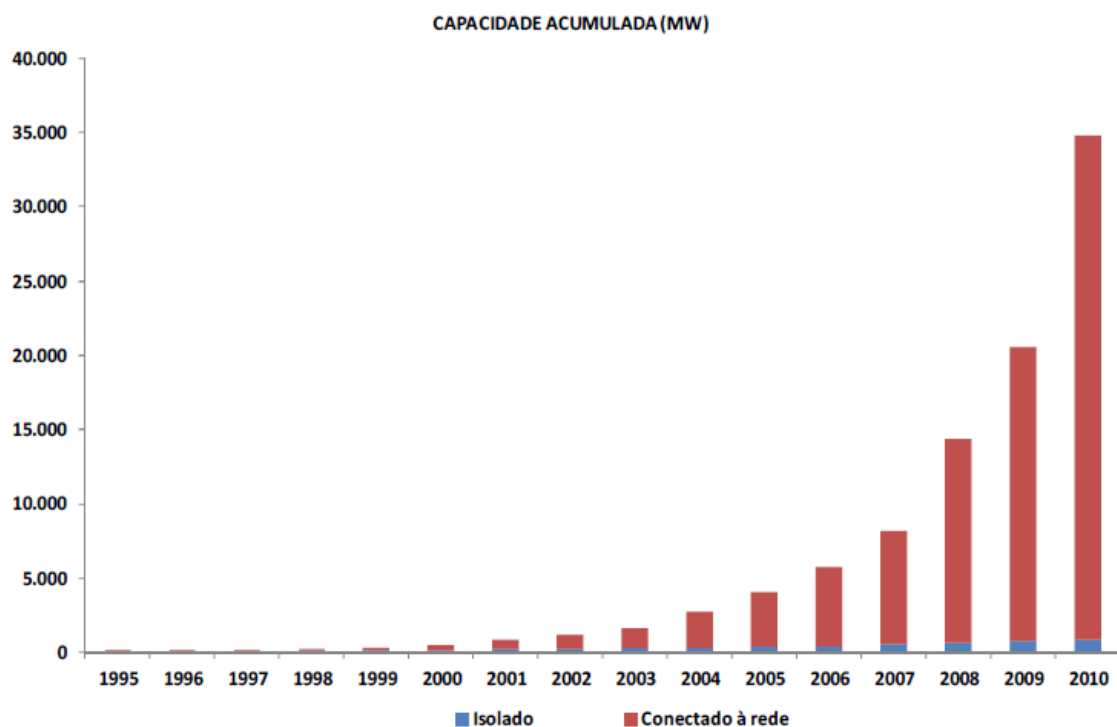


Figura 8 - Evolução da capacidade instalada mundial em geração fotovoltaica (em MWp) de 1995 a 2010. Fonte: EPE, 2012

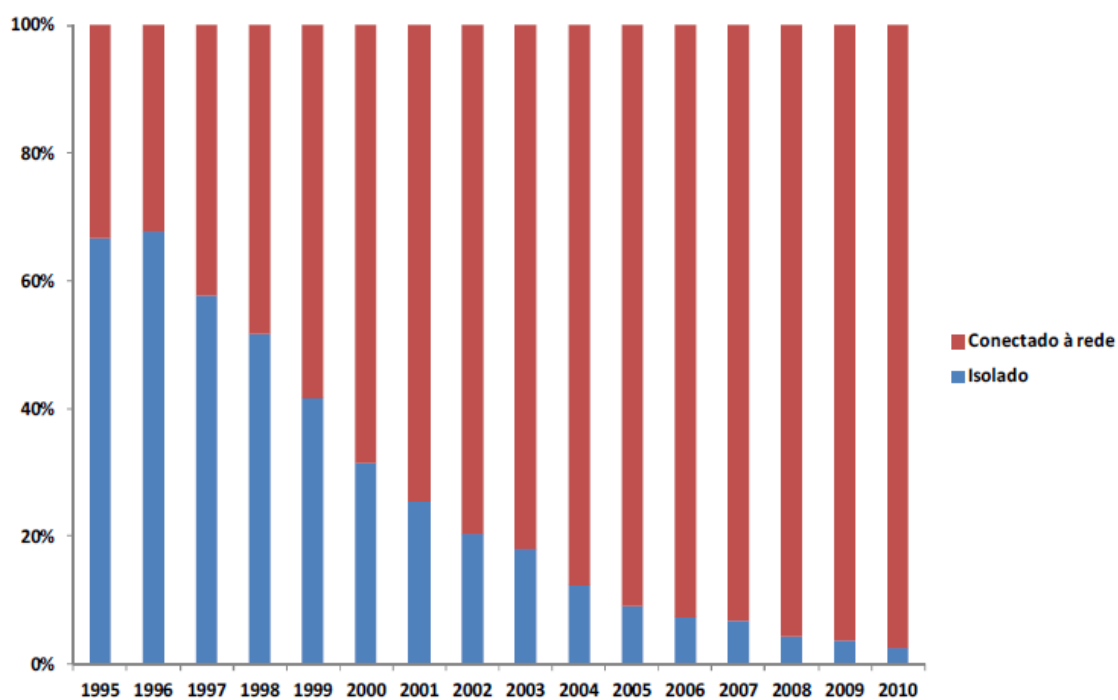


Figura 9 - Evolução da capacidade instalada mundial em geração fotovoltaica (em percentual) de 1995 a 2010. Fonte: EPE, 2012

O sistema fotovoltaico de geração distribuída, ou seja, integrado a rede elétrica, é mostrado na figura 10, e pode ser dividido em algumas partes, detalhadas a seguir:

- Painéis ou módulos fotovoltaicos: Usualmente fabricados de silício cristalino, são equipamentos geram corrente elétrica em corrente contínua a partir da radiação solar. A unidade de potência padrão utilizada nos mesmos é o Watt pico (Wp), que representa a potência máxima que o painel pode suprir e é determinada utilizando-se simulador solar, de acordo com os procedimentos da norma ABNT NBR 11876 de 2010, "Módulos fotovoltaicos- Especificação", de forma que painéis com valores de Watt pico iguais gerem montantes semelhantes de energia no mesmo intervalo de tempo.
- Inversor: São os equipamentos que, a partir da corrente contínua gerada pelos módulos fotovoltaicos, geram eletronicamente uma senóide (corrente alternada) que é sincronizada com a senóide da rede elétrica a fim de possibilitar a injeção de energia elétrica gerada pelos módulos fotovoltaicos na rede. Convém ressaltar que este equipamento deve obedecer, entre outras normas, o "Procedimento de ensaio de anti-ilhamento para inversores de sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica", descrito na norma ABNT NBR IEC 62116 de 2012, a fim de cumprir requisitos de segurança em caso de queda de energia da rede elétrica (neste caso o sistema deverá parar de injetar energia na rede), sendo, portanto um equipamento crítico em relação à segurança do sistema elétrico. A seguir, uma tabela com a lista de equipamentos homologados pela Companhia Paranaense de Energia (COPEL), na qual percebe-se a existência de potências que vão desde 270Wp (chamados micro inversores, adequados para ligação individual em cada painel) até 27600Wp (adequados para conexão de vários conjuntos de painéis).

Tabela 2 - Listagem dos inversores homologados pela concessionária COPEL até 4 de Março de 2014 para utilização em micro e mini geração distribuída. Fonte: adaptado de COPEL, 2014

Fabricante	Modelo	Potência (kWp)
Advanced Energy	PV Powered - PVP2000	2
B&B Power	SF 1600TL/3000TL/5000TL	1,6/3,0/5,0
CP Eletrônica	INVSOL 1000	1
Enphase Energy	M215	0,27
Fronius	IG Plus 25/30/35/50/55/60V-1	2,6/3,0/3,5/4,0/5,0/6,0
KLNE	Sunteams 1500/2000/3000/4000/5000	1,5/2,0/3,0/4,0/5,0
Power-One	Aurora Trio-20.0TL-OUTD/Trio-27.6TL-OUTD	20,0/27,6
SAJ	Sununo TL1.5K/2K/3KA/3KB/4KA/4KB/5K	1,5/2,0/3,0/3,3/4,0/4,4/5,0
Santerno	M Plus 1300E/2600E/3600/3600E/4300/4300E/5300/6400/7800	1,0/2,0/2,8/2,8/3,3/3,3/4,1/4,9/6,0
Schneider	Conext TX2800NA/TX3300NA/TX3800NA/TX5000NA	2,8/3,3/3,8/5,0
SMA	Sunny SMC 4600A/5000A/6000A/7000HV	4,6/5,0/6,0/7,0
Steca	Stecagrid 2020	2
Xantrex	GT2.5/3.0/3.3/3.8/4.0/5.0	2,5/3,0/3,3/3,8/4,0/5,0

- Medidor de energia solar: Faz a medição de energia, em kWh (quilo Watt hora) gerada pelo painel ou módulo fotovoltaico logo após o sinal de ser convertido de corrente contínua para corrente alternada, de forma a medir toda a energia útil gerada pelo sistema fotovoltaico. Alguns modelos de inversores possuem estes medidores embutidos.
- Seccionador: Este chaveamento pode ser localizado no próprio painel de energia da residência. Há necessidade de uma chave seccionadora para desligamento do sistema de geração fotovoltaica da rede elétrica, para períodos de manutenção ou contingência.

- Medidor de energia bidirecional (entrada/saída): É um medidor bidirecional, isto é, mede tanto a energia suprida pela rede elétrica (que gera faturamento para a concessionária) quanto a energia gerada pelo sistema fotovoltaico e injetada na rede elétrica (que gera créditos de energia para o consumidor/gerador).

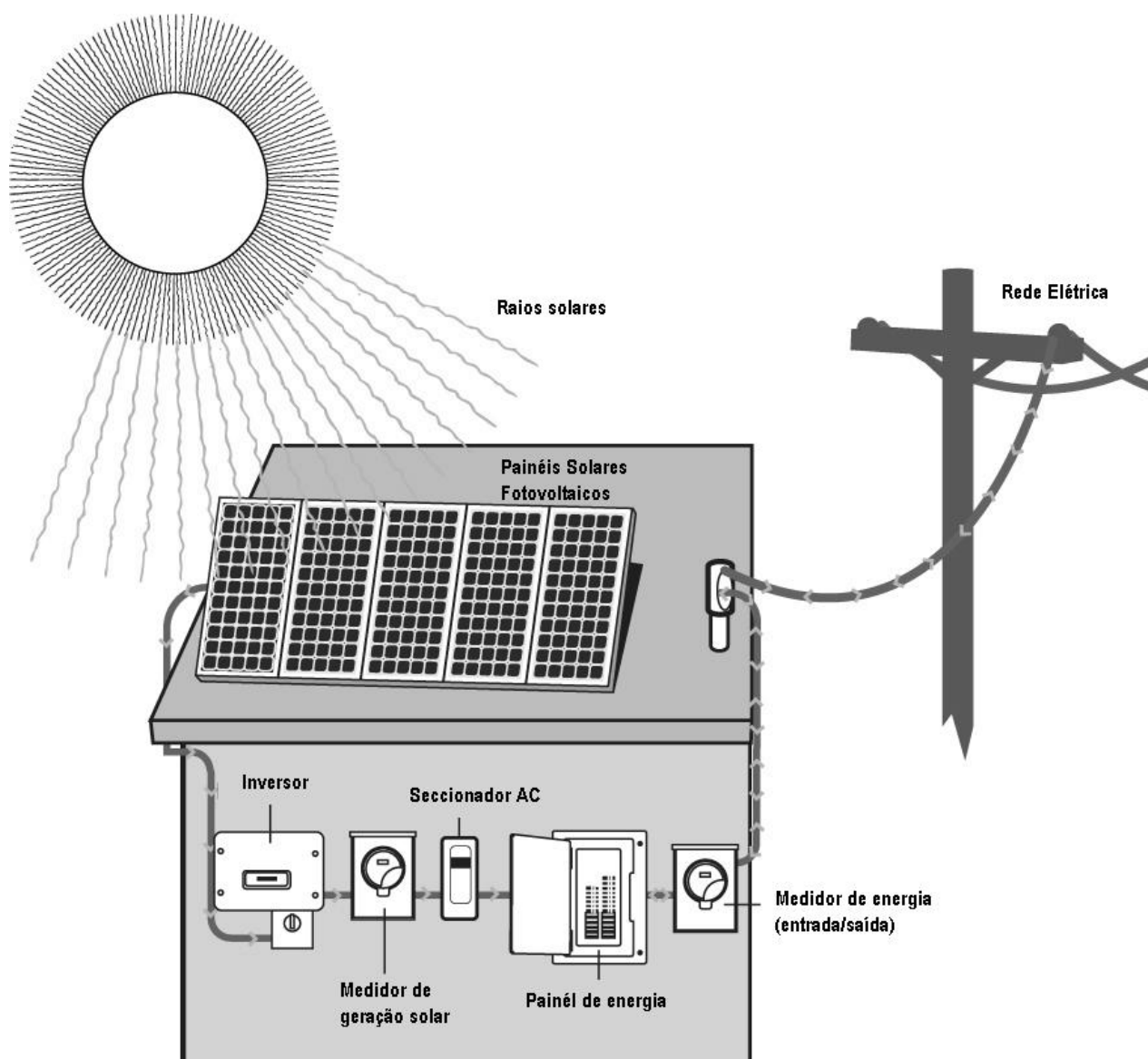


Figura 10 - Esquema básico de um sistema de geração fotovoltaica conectada à rede elétrica (grid-tie). Fonte: TFS Solar, 2014

A nova regulamentação brasileira estabelece que o consumidor poderá ver compensada a energia que utilizou da rede com aquela que injetou na rede até no máximo zerar a sua conta mensal, mas não será remunerado com tarifa

pela injeção de energia na rede de distribuição. Independentemente disso, o fato é que já é possível ao pequeno consumidor obter uma compensação econômica para a energia que o mesmo produz de forma distribuída.

Não há como afirmar, no entanto, se esta compensação é suficiente para se estimular o desenvolvimento da microgeração fotovoltaica em volumes substanciais, já que a normatização vigente data do início do ano de 2013, e até o momento o crescimento deste tipo de geração de energia elétrica ainda se mostra tímido, mesmo que a norma NTC 905100 da Companhia Paranaense de distribuição de energia elétrica, que dispõe sobre os pedidos de ligação de sistemas de mini e micro geração distribuída, já vigore há mais de um ano, conforme será analisado em capítulos a seguir.

Observa-se, assim, que o Brasil já possui embasamento normativo para a micro geração (até 100kWp instalados) e mini geração (até 1MWp instalados) distribuídas, cujo marco normativo foi a resolução nº 482 de 2012 da ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica), e que consiste em possibilitar ao pequeno consumidor gerar sua própria energia elétrica e injetar o excedente diretamente na rede elétrica, de acordo com normas já determinadas pela ABNT e de forma a gerar créditos de energia junto à concessionária, mas nenhuma outra compensação financeira.

2.6 Custo do sistema fotovoltaico

Há muito se escuta a respeito da redução de custos de painéis fotovoltaicos, assim como a respeito de novas perspectivas de desenvolvimento de novas tecnologias que usem outros materiais fotovoltaicos de custo ainda menor. No entanto, como pode-se observar na primeira parte do trabalho, atualmente a matriz mundial de geração fotovoltaica instalada usa, quase em sua totalidade, silício para a fabricação das módulos fotovoltaicos, que, de fato, tiveram uma grande redução de custo nos últimos anos. (EPE, 2012 pg. 22 - 23) (BRAZILIAN, et. al, 2013 pg. 2)

O custo tratado nesta parte do trabalho, portanto, é relativo ao custo dos sistemas convencionais, de silício cristalino.

Algumas confusões são usualmente criadas a respeito das diferentes formas de se apresentar a analisar economicamente os custos de um sistema de geração fotovoltaica. Estas análises têm sido feitas, principalmente por meio de três métricas: O preço por Watt (pico) para aquisição do sistema fotovoltaico, normalmente expresso em dólares por Watt; o custo nivelado de energia elétrica (LCOE, ou *Levelized Cost of Energy*), geralmente expresso como dólares por kWh (energia); e o conceito de "paridade da rede" (*grid parity*). Cada uma dessas métricas pode ser calculada de diversas maneiras e dependem de uma ampla gama de hipóteses que se estendem por considerações técnicas, econômicas, comerciais e políticas. Assim, a utilidade destas três métricas varia drasticamente de acordo com a audiência e finalidade (BRAZILIAN, et. al, 2013 pg. 2).

O custo de um sistema fotovoltaico completo, integrado a rede elétrica, pode ser mostrado através do custo total do sistema, neste caso é usualmente dividido em três partes: Módulos fotovoltaicos (painéis); Inversor; e o "*Balance of System*" ou BoS, que engloba equipamentos elétricos auxiliares, cabos, conexões, seccionadores, estruturas mecânicas, e custos do serviço de montagem (ou seja, tudo que não for classificado como "módulo fotovoltaico" ou "inversor") (EPE, 2012 pg. 22). Outra maneira usual de mostrar os custos de geração fotovoltaica é calcular o *Levelized Energy Cost* (abreviado como LEC ou LCOE) ou custo de energia nivelado, que é o custo da energia gerada a partir da fonte fotovoltaica, e que depende basicamente no tempo de vida do equipamento, do investimento para aquisição dos equipamentos, dos custos de manutenção, e da energia gerada pelo sistema (ECLAREON, 2013 pg. 9)

No relatório da Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2012 pg. 22) intitulado "Análise da Inserção da Geração Solar na Matriz Elétrica Brasileira", há algumas informações quantitativas a respeito da redução do preço dos módulos fotovoltaicos, que, segundo o mesmo relatório, no ano de 2000 foi de \$4,20 Euros por Watt de pico (Wp). Assim, tem-se que a maior responsável

pela variação do custo do sistema fotovoltaico completo é a grande redução nos últimos anos, principalmente no custo dos painéis fotovoltaicos (EPE, 2012 pg. 22 - 23), que acontece de forma notável, para o sistema completo, após o ano de 2004 (BRAZILIAN et al., 2013 pg. 2). O inversor é um item cujo processo produtivo foi razoavelmente consolidado e padronizado na indústria e o mesmo já obteve reduções relativas ao aumento de escala (quanto à utilização em sistemas fotovoltaicos), também itens como cabos, conexões, estruturas mecânicas, etc., que têm como característica menor complexidade produtiva e dependem principalmente do preço dos insumos dos materiais utilizados nos mesmos, não sofreram grandes variações (EPE, 2012 pg. 23).

Tem-se ainda, que o preço final do sistema completo de geração fotovoltaico, por depender em grande parte de itens produzidos no exterior, engloba grandes fatias de impostos, conforme tabela abaixo, extraída do relatório técnico já mencionado, intitulado "Análise da Inserção da Geração Solar na Matriz Elétrica Brasileira" (EPE, 2012 pg. 27). Como pode-se observar, o preço final cai de R\$ 8,36 para R\$ 6,31 excluindo-se a carga tributária. A redução de carga tributária, portanto, se mostra como uma das possíveis maneiras de se reduzir o custo destes sistemas ao consumidor final.

Tabela 3 - Preço unitário de sistemas completos (exceto montagem) Fonte: Grupo Setorial Fotovoltaico da Associação Brasileira da Indústria Elétrica e Eletrônica - ABINEE

Carga Tributária Exemplo instalação Corporativa 100 KWp									
Componente	Preço cliente final	II	ICMS	IPI	PIS	COFINS	ISS	Carga tributária cliente final	Sistema sem impostos
Modulo	R\$ 406.802	12%	0%	0%	1,65%	7,65%	0%	R\$ 71.802 18%	R\$ 335.000
Inversor	R\$ 156.402	14%	12%	15%	1,65%	7,65%	0%	R\$ 58.594 37%	R\$ 97.808
Estruturas, cabos, conexão	R\$ 195.000	0%	18%	10%	1,65%	7,65%	0%	R\$ 60.937 31%	R\$ 134.063
Projeto, registro, instalação *	R\$ 78.000	0%	0%	0%	1,65%	7,65%	5%	R\$ 14.235 18%	R\$ 63.765
	R\$ 836.203							R\$ 205.567	R\$ 630.636
								25%	75%
Preço sistema R\$/ Wp	R\$ 8,36							R\$ 2,06	R\$ 6,31

O mesmo estudo sugere ainda (EPE, 2012 pg. 48)., que caso fosse determinado um incentivo na forma de isenção tributária para os componentes do sistema de geração fotovoltaica, o custo da energia gerada seria

comparável com o preço da energia cobrada pela concessionária, conforme mostra a figura 11, onde as linhas vermelhas mostram o custo da energia estimado para uma potência instalada de 5kWp e a linha laranja mostra o custo da energia para uma potência instalada de 10kWp (que apresenta uma razoável redução de custo por MWh), sendo que as linhas contínuas representam o custo da energia considerando-se os impostos e as linhas tracejadas representam o custo com isenção tributária. A área cinza representa o custo da energia praticado por cada uma das concessionárias de energia, sendo que a linha em verde destaca a empresa responsável pela distribuição de energia elétrica no estado do Paraná (COPEL).

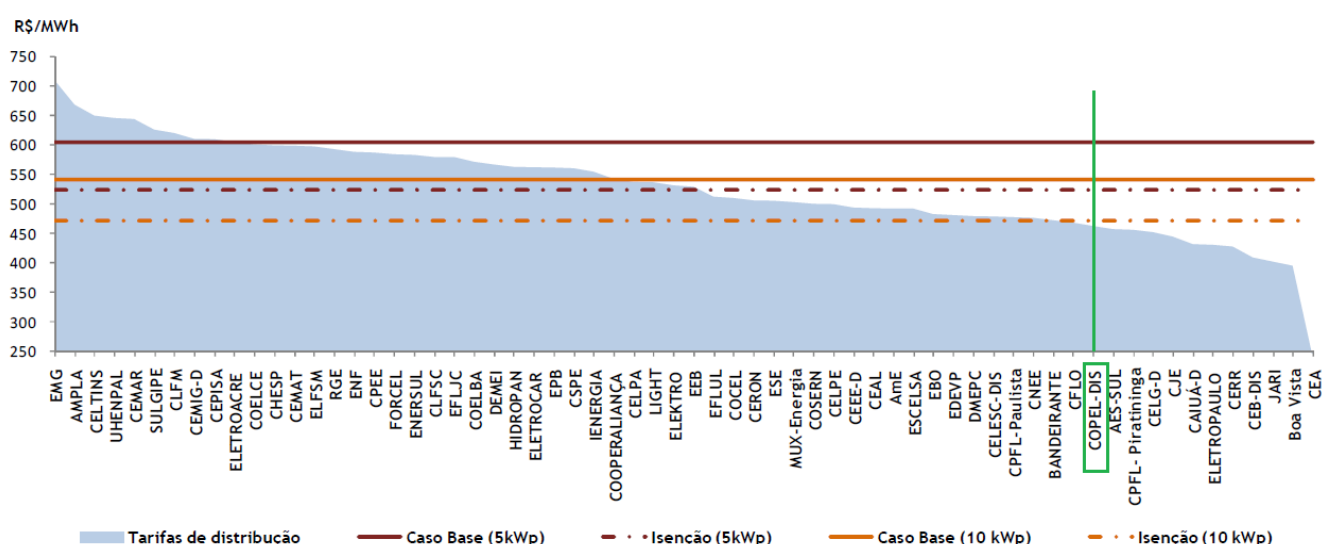


Figura 11 - Comparação de custo de energia gerada a partir de um sistema fotovoltaico no Brasil em comparação com o preço praticado pela concessionária de energia Fonte: Adaptada de EPE, 2012

Há de se ressaltar que no Brasil começa-se a observar algumas iniciativas recentes que vêm a incentivar a produção de energia fotovoltaica, como algumas isenções tributárias em São Paulo (NEVES, 2013).

Uma forma que utiliza um grande espectro de informações (BRAZILIAN, et. al, 2013 pg. 2) para analisar a viabilidade de instalação de um sistema de geração fotovoltaica, é a matriz de posicionamento que relaciona a proximidade ao custo da energia da rede (cobrado pela concessionária) e o nível de suporte

regulatório de cada região, conforme o gráfico apresentado na figura 12, que foi retirada do relatório *"PV GRID PARITY MONITOR Residential Sector 2013"* gerado pela empresa ECLAREON, que periodicamente publica informações estratégicas a respeito da viabilidade da geração fotovoltaica distribuída em relação aos países que possibilitam este tipo de modalidade (ECLAREON, 2013 pg. 6).

Para que haja uma viabilidade completa para instalação de um sistema fotovoltaico, a região que representa a localidade deverá estar no quadrante superior e ao lado direito do gráfico, o que indicaria: tanto um preço inferior da energia gerada pelo sistema fotovoltaico em relação à energia ofertada pela concessionária (quando acima da linha pontilhada horizontal); quanto suporte regulatório efetivo para este tipo de modalidade de geração (quando ao lado direito da linha pontilhada vertical). Assim, observa-se viabilidade financeira nos países representados acima da linha pontilhada horizontal, e viabilidade regulatória nos países ao lado direito da linha pontilhada vertical.

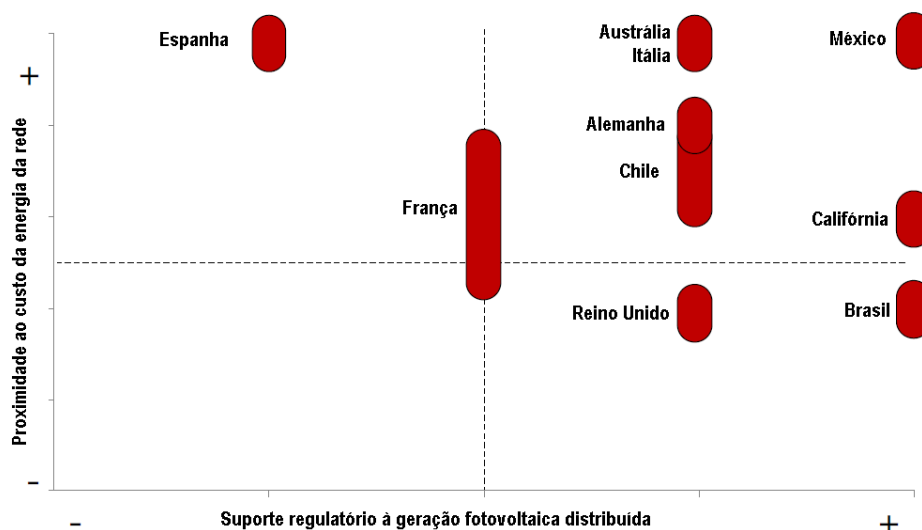


Figura 12 - Matriz de posicionamento de regiões em relação à viabilidade de sistemas de geração fotovoltaicos integrados à rede elétrica. Fonte: Eclareon, 2013.

A situação da Espanha se mostra peculiar, já que o país apresenta uma situação em que há viabilidade financeira do sistema fotovoltaico (em relação ao preço da energia cobrado pela concessionária), no entanto não existe suporte regulatório razoável pelo não cumprimento dos contratos de micro-

geração distribuída por parte do governo, em virtude da crise financeira que assola o país (FORBES, 2013).

A situação do Brasil em relação ao custo da energia corrobora com o mostrado no gráfico anterior, já que, em média, o custo da energia gerada pelo sistema fotovoltaico ainda não mostra-se viável (muito embora em alguns estados esse limiar já tenha sido cruzado), porém já se aproxima do limiar em que o custo da energia ofertada pela concessionária é igual ao custo da energia produzida pelo sistema fotovoltaico. Ressalta-se que a recente política de redução do custo da energia elétrica, adotada pelo atual gestão do governo federal, teve, de certa maneira, como efeito colateral a arrefecimento na viabilidade de utilização de sistemas alternativos de geração distribuída, entre estes o sistema fotovoltaico.

Em relação ao suporte regulatório o Brasil se encontra em posição privilegiada (ECLAREON, 2013 pg. 6 - 7), face a recente promulgação de normas a respeito do tema, assim como a adoção de normas ABNT baseadas em normas internacionais para equipamentos de geração fotovoltaica, tais quais o "Procedimento de ensaio de anti-ilhamento para inversores de sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica", referência ABNT NBR IEC 62116 de 2012 e a norma " Módulos fotovoltaicos — Especificação" referência ABNT NBR 11876 de 2010.

Cabe ressaltar que em algumas localidades brasileiras, que possuem como características altos níveis de radiação solar, o aumento da competitividade dos sistemas fotovoltaicos já permitiu alcançar o limiar da viabilidade do sistema, como no caso da cidade de Itacarambi, ao norte de Minas Gerais. O mesmo ainda não acontece em São Paulo, por exemplo, onde o preço da energia da rede elétrica ainda se mostra mais viável que o preço do sistema fotovoltaico (ECLAREON, 2013 pg. 22).

Pode-se concluir, portanto, que o Brasil está muito próximo (em algumas situações já pode ser considerado viável) de viabilizar economicamente a geração fotovoltaica distribuída, sendo necessário, para tanto: a redução do custo dos equipamentos necessários para a geração fotovoltaica distribuída (a

partir de incentivos, tais quais isenção tributária ou outros); ou então o aumento do preço da energia.

2.7 Payback energético de painéis fotovoltaicos

Produzir eletricidade com sistemas fotovoltaicos é uma forma ambientalmente razoável (JANUZZI, 2000, p. 57) (BRAZILIAN et al., 2013 pg. 2) afinal não emite poluentes nem gases de efeito estufa e não consome recursos energéticos de origem fóssil. No entanto, é necessário energia para economizar energia, isto é, é necessário usar energia para produzir o painel fotovoltaico e demais itens do sistema. O termo "payback energético" captura esta ideia, e nos diz qual é o tempo que um sistema de geração fotovoltaica precisa operar para recuperar a energia utilizada para produzir o próprio equipamento que gera esta energia (NREL, 2004).

Um dos mitos acerca da geração fotovoltaica diz respeito a quantidade de energia consumida durante a produção dos painéis fotovoltaicos de silício, e afirma que um painel fotovoltaico gastaria mais energia para ser produzido do que a energia que o mesmo painel geraria ao longo de toda sua vida útil, que atualmente passa dos 20 anos para painéis de silício cristalino. No entanto, esta informação se mostra imprecisa quando se analisados os dados contidos em um relatório de 2012 (vide figura 13) a respeito de produção de energia fotovoltaica do Fraunhofer Institute, que mostra a evolução do tempo de *payback* energético (tempo para geração do mesmo volume de energia utilizada na produção do painel) para painéis de silício cristalino instalados no sul da Europa, tendo como referência uma radiação solar de 1700 kWh/m²/ano. O estudo conclui que o tempo é de pouco mais de um ano, no entanto convém ressaltar que este nível de insolação é inferior a média brasileira, sendo, portanto, possível dizer que no Brasil o tempo de retorno de investimento energético será ainda mais reduzido.

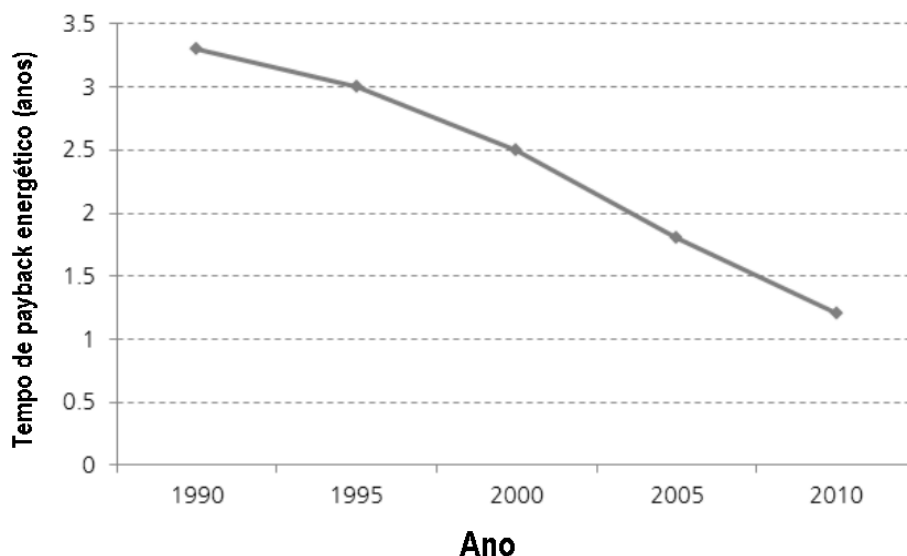


Figura 13 - Evolução do tempo de "payback energético" de silício cristalino ao longo do tempo na Europa. Fonte: FRAUNHOFER, 2012

Pode-se concluir, portanto, que o tempo que um painel fotovoltaico comum leva para gerar a energia consumida durante sua própria produção não inviabiliza a utilização desta tecnologia, pois este período gira em torno de um ano enquanto os painéis atuais têm vida útil de mais de 20 anos.

2.8 Perdas de transmissão

Um sistema de geração de energia elétrica como a microgeração fotovoltaica distribuída, muito embora tenha perdas consideráveis em relação à eficiência total do sistema e limitações em relação ao suprimento ininterrupto de energia, mostra-se uma solução satisfatória no quesito "perdas de transmissão", posto que, segundo a Resolução Normativa nº 482 de 2012 da ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica), a micro e mini geração distribuída podem ser definidas como centrais geradoras de energia elétrica conectadas diretamente na rede de distribuição por meio de instalações de unidades consumidoras, não havendo, assim, o que se falar em perdas na

transmissão de energia no caso não apenas da geração fotovoltaica, mas de qualquer tipo de geração distribuída.

Na obra "O Setor Elétrico Brasileiro e a Sustentabilidade no Século 21: Oportunidades e Desafios", publicada em 2012 há um artigo cujo título é "Um olhar para as grandes perdas de energia no sistema de transmissão elétrico brasileiro" (REY, 2012 pg. 43), onde a autora, Oriana Rey, afirma que, já em 2004, a ANEEL estava ciente que as perdas (técnicas e comerciais) do Brasil eram muito superiores aos demais países da América do Sul. Enquanto o Brasil teve uma perda de 20,28% na distribuição no sistema elétrico (perdas técnicas somadas às perdas comerciais), outros países apresentam perdas muito menores: Chile 5,6%, Colômbia 11,5%, Peru 9,3% e Argentina 9,9%.

A autora afirma ainda que estes dados demonstram o cenário alarmante de desperdício de energia elétrica no Brasil, afinal este montante de energia (cerca de 20% do total gerado) representaria, basicamente, o equivalente ao gerado pela usina de belo Monte, que será, aliás, a maior usina hidroelétrica brasileira (posto que ITAIPU tem caráter binacional). Assim, se tornariam questionáveis as estratégias para a atual matriz energética que, em vez de priorizar programas de combate de perda de energia elétrica nas linhas de transmissão (perdas técnicas), busca resolver a demanda de energia por meio da construção de novas fontes de geração, como novas hidrelétricas de grande porte que, além de absorverem significativo montante de recursos públicos, implicam em significativos impactos socioambientais (REY, 2012 pg. 44).

Pode-se concluir, portanto, que uma das grandes vantagens do sistema de geração fotovoltaico distribuído reside justamente no fato do mesmo ser "distribuído", afinal neste caso não há o que se falar em perdas de transmissão; e que as perdas de energia (técnicas e comerciais) representam dos problemas atuais da matriz de geração de energia elétrica no Brasil, muito embora o foco do planejamento energético continue ser priorizar a construção de novas grandes usinas ao invés de procurar melhorar a eficiência energética do sistema.

2.9 Interesses políticos e econômicos

Soluções alternativas para micro e mini geração distribuída de energia elétrica, tal qual a microgeração fotovoltaica distribuída, muito embora mostrem-se cada vez mais plausíveis para suprir a demanda de energia elétrica do pequeno consumidor doméstico ou comercial, certamente seriam incapazes de suprir a demanda dos setores eletrointensivos (BERMANN, 2013 pg. 32), altamente dependentes de usinas de grande porte e de alto fator de capacidade, dada o enorme volume de energia e período de produção necessários para estas aplicações.

Em artigo intitulado "O Setor de Eletro-intensivos", incluso no relatório "O setor elétrico brasileiro no século 21: cenário atual e desafios", Célio Bermann afirma que quase 8% da energia elétrica consumida no Brasil deixa o país incorporada no minério de ferro, em produtos siderúrgicos, nos lingotes de alumínio, nas ligas de ferro, e no papel e celulose que são exportados (BERMANN, 2012 - pg. 32), ou seja, quase um décimo da energia elétrica brasileira gerada é consumida na produção (da parcela que é exportada) de apenas seis produtos diferentes, todos oriundos da indústria eletro intensiva.

O mesmo autor, em outro artigo contido na mesma obra, este intitulado "O setor elétrico brasileiro no século 21: cenário atual e desafios", afirma ainda que, sob a influência de grandes grupos econômicos, nacionais e internacionais, e seus aliados políticos, que formam a base da "indústria das barragens" (chamada "*dam industry*") no Brasil, o governo federal construiu um sistema elétrico que prioriza fortemente a geração hidrelétrica, estimulando subsectores industriais e atendendo o suprimento a determinados setores em detrimento de outros, de forma a criar um emaranhado de interesses e menosprezando a eficiência energética ou outras fontes, com simples utilização de cenários de crescimento de demanda para traçar estratégias, sem que haja questionamento de seus pressupostos (BERMANN, 2012 - pg. 19).

Muito embora o termo "indústria das barragens" possa soar pejorativo, há de se ressaltar que, no ano de 2012, seis dos dez maiores doadores

privados para campanhas de prefeitos e vereadores em todo o País foram empreiteiras, com doações da ordem de dezenas de milhões de reais (ROSSI, 2012).

A atual forma de se criar políticas estratégicas em relação a matriz energética é basear-se no Produto Interno Bruto (PIB) estimado para o futuro, porém, este pode ser um procedimento perigoso no que tange a aspectos ambientais. Neste sentido a autora Paula franco Moreira, no artigo intitulado "Planejamento Energético e o PIB", que também faz parte do relatório "O Setor Elétrico Brasileiro e a Sustentabilidade no Século 21: Oportunidades e Desafios.", esclarece que atualmente a oferta de energia é calculada em função da previsão de crescimento do PIB. É evidente que o planejamento energético precisa apoiar-se em um indicador mais plural que não o PIB, sob pena do planejamento energético ocorrer dentro de um subsistema econômico falsamente infinito, falsamente pois o mesmo é, de fato, limitado pela finitude do planeta. (MOREIRA, 2012 - pg. 25). Cabe ressaltar a importância e de pesquisas a respeito de novos indicadores alternativos ao PIB que considerem adequadamente os aspectos ambientais. Neste sentido, pode-se citar como exemplos o trabalho " Alternativas de medição do desempenho das economias na óptica da sustentabilidade " (FIGUEIREDO; A AZEVEDO; CATARINO, 2008) ou ainda o trabalho "Mensuração do Desenvolvimento Socioeconômico e Ambiental" (COSTA; LUSTOSA, 2007)

Pode-se dizer, portanto, que a geração fotovoltaica distribuída poderia suprir as demandas de energia de pequenos consumidores (mesmo que sejam necessárias outras formas de geração combinadas), no entanto, para suprir a demanda de consumidores eletro intensivos são necessárias obras de grande porte, construídas por empresas empreiteiras com alto poder e articulação política, criando-se, assim uma "indústria das barragens", situação que é plenamente justificada dentro do planejamento estratégico a partir de previsões de aumento do PIB, o qual só é possível caso a oferta de energia elétrica acompanhe em um aumento proporcional.

3. Objetivos

O presente trabalho traz como objetivo geral:

Analisar o panorama atual da micro geração fotovoltaica distribuída por pequenos consumidores no Estado do Paraná, para inferir se tal tecnologia seria viável como possível fonte geradora de energia exossomática.

Complementarmente o presente trabalho tem os seguintes objetivos específicos:

Levantar potencialidades e aspectos sócio ambientais relevantes acerca da tecnologia de geração distribuída fotovoltaica para pequenos consumidores.

Levantar dados, através de pesquisas e simulações, no intuito de listar e discutir barreiras que porventura impeçam a propagação da tecnologia no Brasil e no Paraná.

Promover a discussão sobre os pontos fortes e fracos de uma possível matriz fotovoltaica de geração fotovoltaica distribuída no estado do Paraná e citar ações para estimular este tipo geração alternativa, de modo a auxiliar estudos futuros.

4. Metodologia

O método utilizado no presente projeto foi, principalmente, o de análise de informações de fontes secundárias, complementado pelos dados cedidos pela Companhia Paranaense de Energia - COPEL, a respeito do número de pedidos de ligação para geração distribuída no Paraná. Por fim foram realizadas algumas simulações de montantes de energia gerados a partir de diferentes localidades, usando-se um simulador gratuito do *National Renewable Energy Laboratory* (NREL).

A fim de se levantar potencialidades e aspectos sócio ambientais relevantes acerca da tecnologia de geração distribuída fotovoltaica para pequenos consumidores, inicialmente foram levantados, a título de contextualização: aspectos relativos ao início da geração de energia elétrica na humanidade, que remontam a origem de certos conflitos de ordem técnica e econômica; aspectos de eficiência energética e complexidade; a geração distribuída e potencial solar mundial; e características da tecnologia fotovoltaica distribuída no mundo, no Brasil e no Paraná.

O trabalho parte então para seu objeto principal de estudo, que é a situação atual da matriz de geração fotovoltaica distribuída no Paraná. Para promover a discussão sobre os pontos fortes e fracos e eventuais barreiras ao aumento da matriz de geração fotovoltaica distribuída no estado, foram analisados: os níveis de insolação da região (comparados a outras localidades); simulações comparativas de geração de energia elétrica em diferentes localidades; o atual panorama da micro geração fotovoltaica distribuída no Paraná. Estas informações foram apresentadas em relação a seus aspectos técnicos, econômicos, ambientais, e sociais.

Através destas observações iniciais, são avaliadas quais destas barreiras se mostram mais ou menos significativas na propagação da tecnologia. Por fim, a partir destas análises, foram levantadas possíveis oportunidades de ações de fomento para estimular a geração fotovoltaica

distribuída, bem como são apresentadas as direções futuras estimular este tipo geração alternativa desta pesquisa e conclusões a respeito do tema.

Por fim, são tecidas algumas considerações finais a respeito do trabalho em sentido amplo, e das perspectivas atuais e futuras em relação a geração fotovoltaica no Brasil e no mundo.

4.1 Potencial solar em diferentes regiões

A energia fotovoltaica ainda é perseguida por alguns mitos, em especial em relação à área necessária para uma geração substancial de energia, porém, dados do no Atlas Solarimétrico do Brasil (2004) indicam que o país tem uma média anual de radiação no território nacional entre 1.642 e 2.300 kWh/m²/ano. Assim, se 0,1% da área do país fosse utilizada com painéis fotovoltaicos, considerando-se uma eficiência de 14% (compatível com a atual eficiência dos módulos comerciais), considerando-se o valor de 1642 kWh/m²/ano (região com o pior nível de radiação solar), poderia ser possível gerar um volume de energia de ~1950 TWh, que representa mais de quatro vezes que a atual demanda de energia elétrica anual do Brasil, estimada em 430 TWh.

Cabe ressaltar que a metodologia utilizada para se analisar o comportamento da eficiência de conversão de módulos fotovoltaicos pode gerar resultados discrepantes dos dados técnicos dos fabricantes. Afinal, os níveis de eficiência sofrem influência da irradiância solar média diária, do ângulo de inclinação dos módulos e também variam com o tipo e o fabricante destes equipamentos. Ainda, ganhos de energia gerada e de eficiência de conversão podem ser observados na mudança de inclinação dos módulos dependendo da época do ano, indicando assim que se adotem inclinações específicas para cada estação do ano, de acordo com cada localidade. (SERAPHIM et al, 2014)

Geograficamente, o trabalho teve como escopo o estado do Paraná, que possui características únicas tanto em relação ao clima quanto à sua matriz de

geração de energia elétrica. Curitiba, especificamente, tem grande "fama" de ser uma cidade com muitos dias cinzas e chuvosos, o que influenciaria negativamente no montante de energia gerado por um sistema de geração fotovoltaica. Foi Curitiba, portanto, a cidade escolhida para a comparação a ser feita na sequência do trabalho. A segunda cidade brasileira cujo nível de insolação será comparado com as demais foi Fortaleza, já que seus níveis de intensidade de radiação solar estão entre os maiores entre as capitais brasileiras, conforme pode ser observado na figura a seguir (SOLARGIS, 2014).



Figura 14 - Soma anual da energia média irradiada horizontalmente entre 1999 e 2011 no

Brasil. Fonte: SolarGIS, 2014

As quatro outras regiões escolhidas para a comparação foram Sevilha e Santander, na Espanha; e ainda Munique e Hamburgo, na Alemanha, por serem cidades com grandes e pequenos índices de radiação, respectivamente, em cada um desses países (ambos com grande parque fotovoltaico instalado, conforme pode ser visto na figura 17). As figuras 14, 15 e 16 mostram a soma anual da energia média irradiada horizontalmente, em kWh/m², em cada uma destas regiões no período entre os anos de 1999 e 2011.

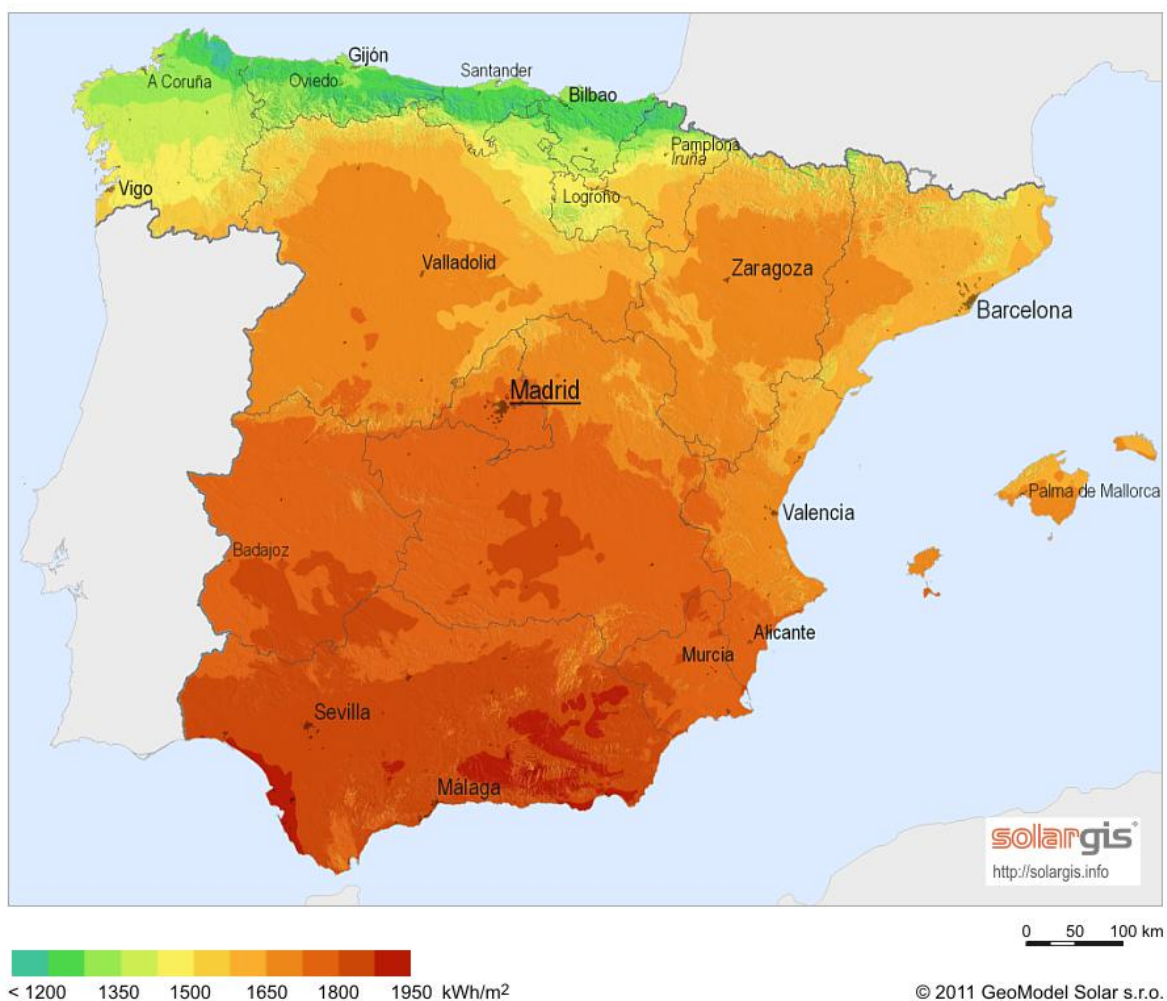


Figura 15 - Soma anual da energia média irradiada horizontalmente entre 1999 e 2011 na Espanha. Fonte: SolarGis, 2014

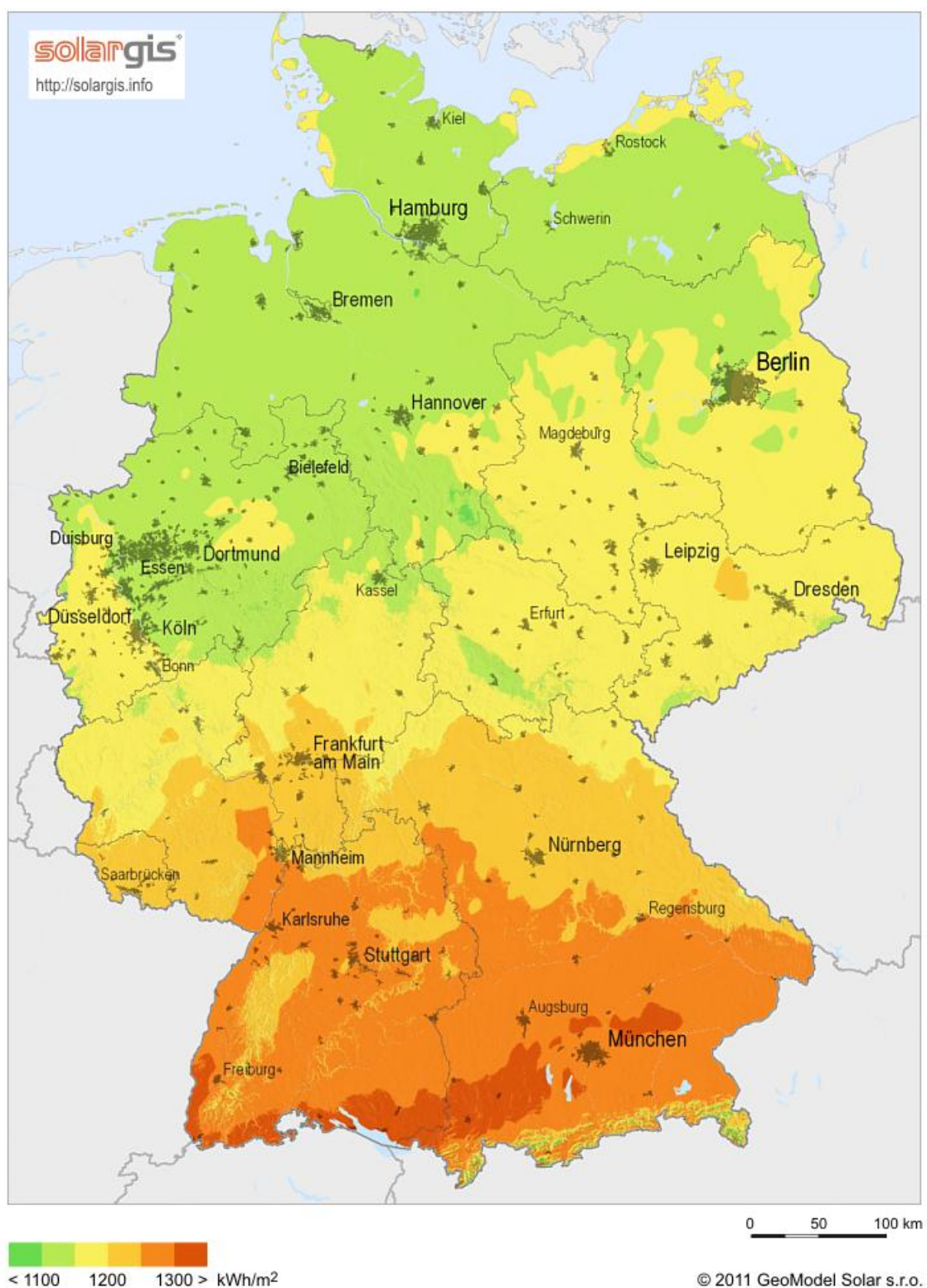


Figura 16 - Soma anual da energia média irradiada horizontalmente entre 1999 e 2011 na Alemanha. Fonte: SolarGis, 2014

A Alemanha e a Espanha foram elencadas para a comparação já que, muito embora sejam países com realidades climáticas, econômicas e políticas diferentes, são os dois países com as maiores parcelas da matriz de geração fotovoltaica distribuída no mundo, conforme pode-se observar na figura 17, extraída do relatório "Análise da Inserção da Geração Solar na Matriz Elétrica Brasileira", formulado pela Empresa de pesquisa energética (EPE, 2012 pg. 36).

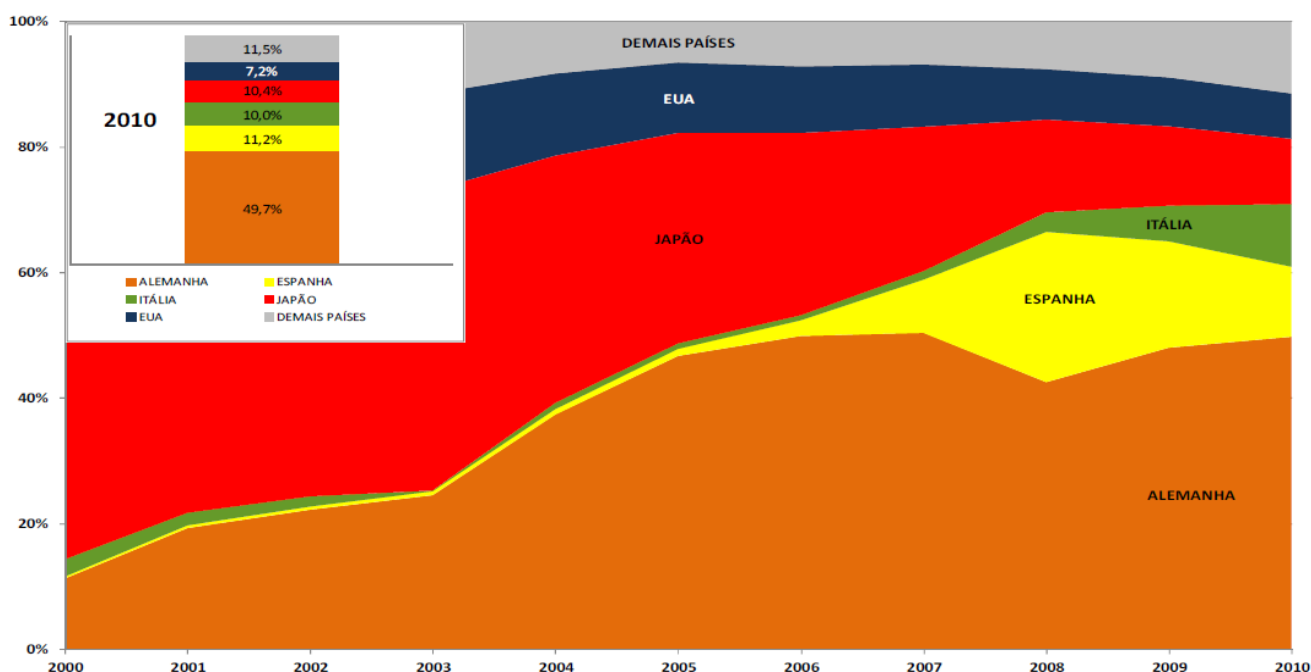


Figura 17 - Evolução da participação dos países em capacidade instalada de geração fotovoltaica (em percentual) entre os anos de 2000 e 2010. Fonte: IEA, 2011

4.2 Simulação de geração fotovoltaica

Para estimar os valores de energia gerados em relação a diferentes localidades foi utilizado o programa simulador "PVWatts: A Performance Calculator for Grid-Connected PV Systems" (PVWATTS, 2014), disponível no sítio do *National Renewable Energy Laboratory* (NREL), que pertence ao Departamento de Energia dos Estados Unidos. Este simulador leva em consideração os parâmetros de potência de pico instalada, fator geral de eficiência de conversão CC-CA (corrente

continua - corrente alternada) e a forma de instalação da fonte fotovoltaica, com objetivo de estimar o montante de energia luminosa convertida em energia elétrica útil.

A utilização do presente método é útil para estimar a capacidade de geração de energia elétrica de qualquer tipo de sistema fotovoltaico, sejam estes painéis ou telhas, a base de células de silício cristalino, filmes finos ou qualquer outra tecnologia fotovoltaica, posto que o cálculo do montante de energia convertida leva em consideração a especificação de Wp (Watt-pico), que é obtida através de testes realizados sob os padrões STC (*standard test conditions*), que pressupõem a potência gerada como 1000 W/m^2 de radiação solar e a temperatura de operação em 25°C . Desta forma, para a mesma insolação, eventuais diferenças na eficiência das fontes fotovoltaicas com mesma especificação de Wp implicariam apenas no aumento ou diminuição da área utilizada pelas células para converter a mesma quantidade de energia.

Convém ressaltar que o mesmo software já foi usado em diversos trabalhos acadêmicos. Como exemplo, no trabalho "Análise da viabilidade técnica de painéis solares fotovoltaicos conectados à rede, com backup de energia, instalados em postos de combustíveis". (TIRAPELLE; MURA; FRAZÃO, 2013)

A fim de estimar a perda de energia relativa aos processos de conversão de corrente contínua (CC) para corrente alternada (CA), foram usados os fatores de eficiência relacionados na tabela a seguir, a saber:

- Precisão de Wp informado pelo fabricante: Há uma margem de erro normal para a determinação da potência de pico (Wp) medida segundo as normas pertinentes.
- Eficiência do inversor e transformador: Há uma perda de energia por efeito Joule (aquecimento) normal em inversores e transformadores, informada pelo fabricante.
- Fator de potência: Tanto os inversores quanto os transformadores costumam apresentar um fator de potência indutivo (atraso do sinal de corrente elétrica

em relação ao sinal de tensão elétrica) que deve ser considerado para se chegar na potência ativa (útil) gerada.

- Diodos e conexões: Tanto os diodos de proteção quanto as conexões causam quedas de tensão que diminuem a eficiência do sistema e, portanto, devem ser considerados.
- Fiação para corrente contínua: Perdas por efeito Joule (aquecimento) na fiação de corrente contínua (entre os painéis e o inversor) são consideráveis, em virtude da baixa tensão usual nesta parte do sistema.
- Fiação para corrente alternada: Muito embora a tensão de saída do inversor, em corrente alternada, apresente valores mais altos, as perdas nesta parte do sistema também precisam ser consideradas.
- Obstrução do painel: Foi considerada uma perda em relação a possíveis obstruções do painel, comum em algumas situações.
- Inoperação para manutenção: Deve ser considerada uma perda de eficiência do sistema em relação aos períodos que o mesmo permanece desligado em virtude de manutenções.

Para se calcular o fator total de conversão do sinal de corrente contínua (na saída do painel) para corrente alternada (na saída do inversor), foi utilizada a equação abaixo:

$$F_t = F_{pr} \times F_{ef} \times F_{pt} \times F_{co} \times F_{fa} \times F_{fc} \times F_{ob} \times F_{in}$$

Onde:

F_{pr} = Precisão de Wp informado pelo fabricante

F_{ef} = Eficiência do inversor e transformador

F_{pt} = Fator de potência

F_{co} = Diodos e conexões

F_{fa} = Fiação para corrente contínua

F_{fc} = Fiação para corrente alternada

F_{ob} = Obstrução do painel

F_{in} = Inoperação para manutenção

F_t = Fator total de conversão CC-CA

Conforme os valores da tabela abaixo, todos estes fatores resultam numa eficiência total de 75%, plausível com a realidade da maioria dos sistemas deste tipo, e já referenciado neste exato valor em outro trabalho (TIRAPELLE; MURA; FRAZÃO, 2013).

Tabela 4 - Fator geral de eficiência de conversão de corrente contínua para corrente alternada. Fonte: Autor

Fator	Eficiência
Precisão de Wp informado pelo fabricante	95,0%
Eficiência do inversor e transformador	91,0%
Fator de potência	98,0%
Diodos e conexões	98,0%
Fiação para corrente contínua	98,0%
Fiação para corrente alternada	99,0%
Obstrução do painel	95,0%
Inoperação para manutenção	98,0%
Fator total de conversão CC-CA	75,0%

A potência instalada considerada para a simulação foi de 1kWp ou 1000Wp para todas as simulações, que poderia representar o consumo de energia elétrica de uma família pequena. Os fatores de sombreamento (*shading*), rastreamento do sol (*sun tracking*) e idade do painel (*age*) foram deixados como padrão (valor 1,00), tomando como parâmetro a inexistência de sombreamento e a instalação da fonte fotovoltaica de forma fixa, ou seja, na melhor posição possível (posição fixa cuja geração de energia é máxima), que, no caso da maioria das regiões do Brasil, será virado para o lado norte com um ângulo (em relação a posição horizontal) igual à latitude da região analisada, e, para Europa, será virado para o lado sul com um ângulo (em relação a posição horizontal) igual à latitude da região analisada. A inclinação da superfície fotovoltaica, portanto, foi de 48,1° Sul para Munique, 53,63° Sul para Hamburgo, 37,4° Sul para Sevilha, 43,47 ° Sul para Santander, 25,5° Norte para Curitiba e 3,8° Norte para Fortaleza,

5. Resultados

5.1 Geração de energia fotovoltaica distribuída no Paraná

A partir de dados obtidos junto ao setor de regulação e distribuição da Companhia Paranaense de Energia (COPEL) de todos os pedidos de ligação de sistemas de mini e micro geração distribuída, foram filtrados apenas os pedidos para ligação de sistema de conversão fotovoltaica recebidos até a data de 14 de Novembro de 2013, e o resultado final foi de 26,0 kWp (COPEL, 2014), ou seja aproximadamente 0,0005%, dos 4756,1MW de potência instalada relativos às 21 diferentes usinas geradoras da COPEL (COPEL, 2014). Na tabela 5 foram listados todos estes pedidos, informando-se o município, a potência instalada e a situação do projeto. Na tabela 7, encontrada nos anexos do trabalho, há a relação completa.

Tabela 5 - Listagem total de pedidos de ligação pra geração fotovoltaica distribuída no estado do Paraná recebidos até a data de 14 de Novembro de 2013. Fonte: COPEL, 2013

Município	Potência instalada (kWp)	Situação
Curitiba	8,6	Ligada
Pinhais	2,3	Ligada
Curitiba	1,0	Aguardando resposta do cliente
Curitiba	2,3	Em análise
Londrina	2,4	Em análise
Cascavel	1,0	Em análise
Cascavel	3,0	Em análise
Francisco Beltrão	2,0	Em análise
Ponta Grossa	1,7	Em análise
Ponta Grossa	1,7	Em análise

Potência total: 26,0

Assim, observa-se que a potência instalada relativa a matriz de geração fotovoltaica distribuída é mundialmente baseada na geração com conexão na rede (*grid tie*), porém, no estado do Paraná ainda se mostra incipiente após cerca de 10 meses de vigência normativa das regras para esta modalidade de geração de energia elétrica.

5.2 Resultados da simulação

A partir destes dados, utilizando-se o programa simulador PVWatts (PVWATTS, 2014) foram gerados os resultados para o primeiro ano de geração de energia gerada em corrente alternada (na saída do inversor) para todas estas localidades, exposto na tabela 6. Nas tabelas 8, 9, 10, 11, 12 e 13, inclusas nos anexos deste trabalho, está disponível o resultado detalhado de cada uma das seis simulações realizadas.

Tabela 6 - Simulações para instalação de painéis fixos com total de potência instalada de 1kWp em diferentes localidades, mostrando a geração de energia (em kWh) a cada mês. Fonte: Autor

	Munique	Hamburgo	Sevilha	Santander	Fortaleza	Curitiba
mês	Energia C.A. (kWh)	Energia C.A. (kWh)	Energia C.A. (kWh)	Energia C.A. (kWh)	Energia C.A. (kWh)	Energia C.A. (kWh)
Janeiro	31	15	91	44	114	102
Fevereiro	56	36	96	69	101	91
Março	70	65	127	88	104	98
Abril	94	92	119	91	96	91
Maio	113	102	138	99	109	85
Junho	91	90	127	99	102	84
Julho	110	87	138	101	111	82
Agosto	103	87	141	106	128	99
Setembro	77	64	122	89	130	84
Outubro	63	44	107	73	130	94
Novembro	29	25	84	42	118	100
Dezembro	22	11	83	42	112	98

A seguir, a título de resumo da simulação, apresenta-se a figura 18, que considera o melhor resultado (Sevilha) como 100% de energia gerada, e mostra o percentual de energia gerada ao longo de um ano em cada uma das demais regiões em relação à região de Sevilha.

Percebe-se que a região de Fortaleza apresenta um montante de energia gerada compatível com a região de Sevilha, e a região de Curitiba aparece em terceiro lugar, com potencial de gerar cerca de 80% da energia gerada em Sevilha. Todas as demais cidades apresentam índices inferiores a 70%, com destaque para os baixos índices de ambas cidades da Alemanha, muito embora este seja o país com o maior parque fotovoltaico instalado do mundo (vide figura 16).

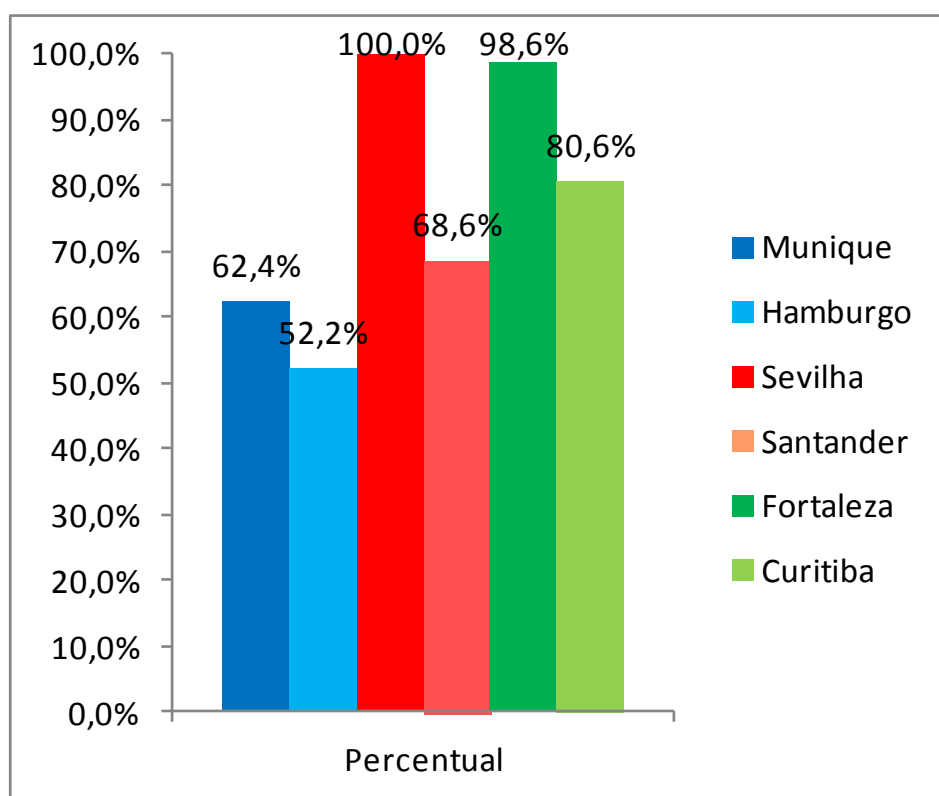


Figura 18 - Resultado geral da simulação que mostra o percentual de geração de energia em cada região em relação ao melhor caso (Sevilha). Fonte: Autor

Conclui-se, portanto, que, muito embora a região de Curitiba apresente resultados piores do que as regiões de maior insolação no Brasil (tal qual Fortaleza), pode gerar cerca de 80% da energia que seria gerada nestas

regiões utilizando o mesmo tipo de equipamento. E que, comparando-se Curitiba com a melhor região da Alemanha (Munique), Curitiba ainda apresenta resultados satisfatórios.

Corrobora com estas conclusões um recente estudo realizado pelo TECPAR (Instituto de Tecnologia do Paraná) a respeito da regularidade de geração de energia solar fotovoltaica na região de Curitiba (AMBIENTE ENERGIA, 2014).

6. Conclusões

Pode-se concluir que a tecnologia de micro geração fotovoltaica distribuída, muito embora careça de fontes complementares (por não armazenar energia), já se mostra viável em aspectos ambientais, técnicos, normativos e está muito próxima de se viabilizar economicamente no Brasil, sendo necessário, para tanto algum incentivo de ordem econômica ou então, o aumento do preço da energia da rede elétrica atual.

Esta tecnologia mostra-se tecnicamente viável inclusive para pequenos volumes de conversão de energia (há modelos de inversores homologados pela COPEL a partir de potências de 270W), e portanto, plausível ao pequeno consumidor de energia. Trouxe a possibilidade real, portanto, de pequenas famílias e comércios participarem efetivamente do sistema de geração de energia elétrica, o que traz, de certa maneira, uma liberdade de escolha individual em relação a forma de conversão de energia.

Em relação à insolação no território paranaense, observa-se que, mesmo estando abaixo da média nacional, ainda pode viabilizar a geração fotovoltaica. Na simulação de geração de energia tomando-se como parâmetro uma potência de pico de 1000W para os painéis fotovoltaicos comparando-se a cidade de Curitiba com as cidades de Sevilha (uma das áreas de maior insolação da Espanha), Fortaleza (uma das áreas de maior insolação do Brasil) e Munique (uma das áreas de maior insolação da Alemanha), Curitiba teve um bom desempenho, chegando a 80,6% da energia gerada no melhor caso (Sevilha) enquanto Munique apresentou apenas 62,4%.

No entanto, tem-se que em um período de quase 11 meses de promulgação da normatização para solicitação de ligações de sistemas fotovoltaicos no Paraná a quantidade de pedidos recebidos pela concessionária COPEL mostra-se ainda reduzido quando comparada a geração da atual matriz paranaense (foram 10 pedidos).

Como medidas de incentivo, principalmente em aspectos financeiros, a fim de viabilizar a instalação em massa destes sistemas, convém ressaltar

exemplos de outros países que poderiam ser implantadas no Brasil, como as tarifas "*feed in*" (que remuneram de forma diferenciada a energia gerada pelo sistema fotovoltaica), subsídios ao investimento inicial (tais quais a redução ou isenção tributária para compra de equipamentos), incentivos à aquisição da energia produzida, planos de educação e treinamento na área, fundos de investimentos para aquisição de sistemas fotovoltaicos e novos padrões em edificações sustentáveis.

Por fim, faz-se necessário não somente que se aprofundem estudos acerca de novas tecnologias, eficiência de processos produtivos e de conversão, emissão de poluentes e outros gases, etc., mas que estes estudos efetivamente comecem a balizar estratégias políticas de fomento e de investimento em matrizes alternativas de energia.

8. Referências

- AMBIENTE ENERGIA. **Tecpar constata geração regular de energia solar em Curitiba ao longo do ano.** Curitiba, 2014. Acessado em 6 de Outubro de 2014. <https://www.ambienteenergia.com.br/index.php/2014/10/pesquisa-tecpar-constata-geracao-regular-de-energia-solar-em-curitiba-ao-longo-ano/24590>
- ANA. Agência Nacional de Aguas. **Nota Técnica n.º 129/2009/GEREG/SOF-ANA: Documento: 00000.018128/2009.** Brasília, 2009. 59 p.
- ANEEL. Agência Nacional de Energia Elétrica. **Atlas de energia elétrica do Brasil.** 3. ed. Brasília : Aneel, 2008.
- ANEEL Legislação (2011). **Nota Técnica nº 4/2011.** Brasília: , 2011. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/consulta_publica/documentos/Nota_Tecnica_SRD_0004_2011.pdf> Acessado em 4 de Dezembro de 2013
- ANEEL Legislação (2005). **Resolução normativa nº 167, de 10 de outubro de 2005.** Brasília: , 2005. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/cedoc/bren2005167.pdf>> Acessado em 4 de Dezembro de 2013
- ANEEL Legislação (2012). **Resolução Normativa nº 482 de 2012.** Brasília: , 2012. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/cedoc/ren2012482.pdf>> Acessado em 4 de Dezembro de 2013
- BERMANN, C. 2010. **Entrevista para o site EcoDebate Cidadania e Meio Ambiente.** Disponível em: <http://www.ecodebate.com.br/2010/07/30/a-energia-hidreletrica-nao-e-limpa-nem-barata-entrevista-com-celio-bermann/>. Acessado em 20/10/2011
- BERMANN, Célio. **O setor elétrico brasileiro no século 21: cenário atual e desafios** In: INSTITUTO SOCIOAMBIENTAL - ISA (Brasil) (Ed.). O Setor Elétrico Brasileiro e a Sustentabilidade no Século 21: Oportunidades e Desafios. Brasília: Ed. Paula Franco Moreira, 2012. p. 17-22.
- BERMANN, Célio. **O Setor de Eletro-intensivos** In: INSTITUTO SOCIOAMBIENTAL - ISA (Brasil) (Ed.). O Setor Elétrico Brasileiro e a Sustentabilidade no Século 21: Oportunidades e Desafios. Brasília: Ed. Paula Franco Moreira, 2012. p. 29-34.
- BLOOMBERG (Ed.). **Solar pain hits China as Suntech unit nears insolvency.** 2013. Disponível em: <<http://www.reuters.com/article/2013/03/20/china-suntech-bankruptcy-idUSL3N0CC22I20130320>>. Acesso em: 02 fev. 2014.
- BP - BP **Statistical Review of World Energy June 2013.** London: BP, 2013. Disponível em: <http://www.bp.com/content/dam/bp/pdf/statistical-review/statistical_review_of_world_energy_2013.pdf> acessado em 04 de Março de 2014.
- BRAZILIAN, Morgan et al. **Re-considering the economics of photovoltaic power.** *Renewable Energy*, Amsterdã, v. 53, n. 1, p.329-338, maio 2013.

CARVALHO, J. e GOLDEMBERG J. **O Desafio do planejamento energético**. 2a ed. Porto Alegre: Mercado Aberto. 1987.

CAPRA, Fritjof. **As Conexões Ocultas: Ciência para uma vida sustentável**. Tradução: marcelo Brandão Cipolla, São Paulo: Cultrix – Amaná Key, 2002

CAPRA, Fritjof. **A teia da vida: uma nova compreensão científica dos sistemas vivos**. Tradução: Newton Roberval Eichenberg. São Paulo: Cultrix, 1996.

COMPANHIA PARANAENSE DE ENERGIA (COPEL) (Paraná). **NTC 905100: MANUAL DE ACESSO DE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA AO SISTEMA DA COPEL**. Curitiba, 2013. 145 p.

COMPANHIA PARANAENSE DE ENERGIA (COPEL) (Paraná). **Micro e Minigeração – Sistema de Compensação de Energia Elétrica** - Disponível em: <<http://www.copel.com/hpcopel/root/nivel2.jsp?endereco=%2Fhpcopel%2Froot%2Fpagcopel2.nsf%2Fdocs%2FB57635122BA32D4B03257B630044F656>> Acessado em 04 de Março de 2014

COMPANHIA PARANAENSE DE ENERGIA (COPEL) (Paraná). **Geração** Disponível em: <<http://www.copel.com/hpcopel/geracao/>> Acessado em 04 de Março de 2014

COSTA, Marcio Jorge PORANGABA e Maria Cecília Junqueira LUSTOSA (2007) **Mensuração do desenvolvimento socioeconômico e ambiental**. VII Encontro da Sociedade Brasileira de Economia Ecológica - EcoEco. Fortaleza, 28 a 30 de novembro de 2007.

CCEE - **Câmara de Comercialização de Energia Elétrica** - Acessado em 10 de Novembro de 2012 URL <<http://www.ccee.org.br/>>

CHAN, Julia. **World's largest PV project comes online with 250MW of PV capacity**. 2012. Disponível em: <http://www.pv-tech.org/news/worlds_largest_pv_project_comes_online_with_250mw_of_pv_capacity>. Acesso em: 05 fev. 2014.

CRAIDE, Sabrina. **Linhas de transmissão de belo monte serão leiloadas em dezembro**. Brasília, 2012. Disponível em: <<http://memoria.ebc.com.br/agenciabrasil/noticia/2012-10-30/linhas-de-transmissao-de-belo-monte-serao-leiloadas-em-dezembro>>. Acesso em: 02 fev. 2014.

CRESESB. **Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos**. Rio de Janeiro, CRESESB, 2004.

DAVIES, Jane; JOGLEKAR, Nitin. **The Market Value of Modularity and Supply Chain Integration: Theory and Evidence from the Solar Photovoltaic Industry**. Boston University School Of Management Research Paper Series, Boston, v. 27, n. 2010, p.1-34, jun. 2010.

DEPARTMENT OF INTERIOR. (Ed.). **Water resources of the state of New York: Number 25 - part II. Water Supply Paper.** Washington: Government Printing Office, 1899.

EDENHOFER,O., PICHSMADRUGA,R., SOKONA,Y., SEYBOTH,K., MATSCHOSS,P., KADNER,S., ZWICKEL,T., EICKEMEIR,P. HANSEN,H., SCHLOMER,S., STECHOW,C. **Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation (SRREN)**, IPCC Working Group III, 2011.

ECLAREON. **PV GRID PARITY MONITOR - Residential Sector.** Berlim: Eclareon, 2013.

EINSTEIN, Albert. **On a Heuristic Point of View Concerning the Production and Transformation of Light.** Annalen der Physik 17, pg 132-148. Berlim, 1905.

ELETOBRAS - Acessado em 10 de Novembro de 2012 URL <<http://www.eletobras.com.br/>>

EPE Empresa de pesquisa energética. **Análise da Inserção da Geração Solar na Matriz Elétrica Brasileira.** Rio de Janeiro: Epe, 2012.

EPE Empresa de pesquisa energética. **Balanco energético nacional 2013 (ano base 2012).** Rio de Janeiro: Epe, 2013.

FIGUEIREDO, Carlos; A AZEVEDO, Fátim; CATARINO, Jorge. **Alternativas de medição do desempenho das economias na óptica da sustentabilidade. Prospectiva e Planeamento.** Lisboa, v. 15, n. 1, p.207-242, jan. 2008.

FIRST SOLAR (Yuma County). **Agua Caliente Solar Project: Project Datasheet.** 2012. Disponível em: <http://www.firstsolar.com/~media/downloads/01761_aguacaliente_ds_na_19oct12_wb.ashx>. Acesso em: 02 fev. 2014.

FORBES. **No End In Sight For Spain's Escalating Solar Crisis.** Jersey City, 2013. Disponível em <http://www.forbes.com/sites/williampentland/2013/08/16/no-end-in-sight-for-spains-escalating-solar-crisis/>. Acesso em: 05 fev. 2014.

FORREST, Stephen R.. **The Limits to Organic Photovoltaic Cell Efficiency.** Mrs Bulletin, Boston, v. 30, n. 1, p.28-32, jan. 2005.

FRAUNHOFER INSTITUTE. **FRAUNHOFER INSTITUTE FOR SOLAR ENERGY SYSTEMS ISE - Photovoltaics Report.** Freiburg: FRAUNHOFER ISE, 2012

FREITAS, Michel et al. **ANÁLISE DE VIABILIDADE FINANCEIRA NA APLICAÇÃO DE TELHAS FOTOVOLTAICAS EM HABITAÇÕES DE INTERESSE SOCIAL SUSTENTÁVEIS.** 7º Congresso Internacional de Bioenergia, São Paulo, 2012.

GARCIA, Marcelo. **Céu ainda nublado para a energia solar.** 2013. Disponível em: <<http://cienciahoje.uol.com.br/especiais/reuniao-anual-da-sbpc-2013/ceu-ainda-nublado-para-a-energia-solar>>. Acesso em: 01 fev. 2014.

GOOSSENS, Ehren; DOOM, Justin. **Biggest Solar Collapse in China Imperils \$1.28 Billion**. 2013. Disponível em: <<http://www.bloomberg.com/news/2013-03-20/biggest-solar-collapse-in-china-imperils-1-28-billion-energy.html>>. Acesso em: 02 fev. 2014.

GROTTON, F. **CRS Report for Congress - Energy Efficiency and the Rebound Effect: Does Increasing Efficiency Decrease Demand?** July 30, 2001

HALLIDAY, David; RESNICK, Jearl Walker. **Fundamentos de física: Eletromagnetismo**. 8. ed. Rio de Janeiro: Ltc, 2009.

HERTWICH, Edgar G. et al. **Integrated life-cycle assessment of electricity-supply scenarios confirms global environmental benefit of low-carbon technologies**. Proceedings of the national academy of sciences. Washington DC, 2013.

IMDB. **Electrocuting an Elephant (1903)**. 1903. Disponível em: <<http://www.imdb.com/title/tt0231523/plotsummary>>. Acesso em: 03 fev. 2014.

JANUZZI, Gilberto de Martino. **Políticas Públicas para Eficiência e Energia Renovável no Novo Contexto de Mercado**. Campinas: Autories Associados, 2000.

JEVONS, William Stanley. **The Coal Question: An Inquiry Concerning the Progress of the Nation, and the Probable Exhaustion of Our Coal Mines**. 2. ed. London: Macmillan And Co., 1865.

KNIER, Gil. **How do Photovoltaics Work?** Columbia: Nasa, 2002.

KNOJI CONSUMER KNOWLEDGE - **Facts About Residential Solar Power Systems** - Acessado em 04 de Março de 2014: <<http://green-building.knoji.com/facts-about-residential-solar-power-systems/>>

LIMA, Paulo César Ribeiro. **Consultoria Legislativa - Terras raras: Elementos estratégicos para o Brasil**. Câmara dos Deputados. Brasília, 2012.

LIOR, Noam. **Energy resources and use: The present (2008) situation and possible sustainable paths to the future**. Energy, Philadelphia, n. 35, p.2631-2638, 2010.

LOMBORG, Bjorn., **The Skeptical Environmentalist**. Cambridge University Press, 2006.

LORENZO, E., **Solar Electricity - Engineering of Photovoltaic Systems**. 321p., Progensa, Sevilha, Espanha, 1994.

MARTINEZ-ALIER, Joan. **Curso de economia ecológica**. México: Instituto Latino Americano de Ecologia Social/ECO-ECO, 1996.

MCNICHOL, Tom. **AC/DC: the savage tale of the first standards war**. Estados Unidos: John Wiley and Sons. 2006.

MELUCCI, A. **Challenging codes: collective action in the information age.**, Introduction. Prophet: the one who speaks before, Cambridge: Cambridge University Press. 1995.

MOREIRA, Paula Franco. **Planejamento Energético e o PIB** In: INSTITUTO SOCIOAMBIENTAL - ISA (Brasil) (Ed.). O Setor Elétrico Brasileiro e a Sustentabilidade no Século 21: Oportunidades e Desafios. Brasília: Ed. Paula Franco Moreira, 2012. p. 23-28.

MORIN, Edgar e KERN, Anne Brigitte. **Terra Pátria**. Tradução: Paulo Neves. Porto Alegre: Editora Sulina, 2003.

NEVES, Leandro. **Energia solar ganha incentivos do governo federal e estaduais: Fonte poderá se tornar competitiva a médio prazo, segundo especialistas**. O estado rj. Rio de Janeiro, p. 1. 13 set. 2013.

NREL - PV FAQs - **What is the energy payback for PV?** Washington, D.C., U.S. Department of Energy Office of Energy Efficiency and Renewable Energy, 2004

ONS - Operador Nacional do Sistema Elétrico. **Glossário de termos técnicos: Submódulo 20.1**. Brasília: Ed. ONS, 2009. PVWATTS - A Performance Calculator for Grid-Connected PV Systems, NREL. Acessado em 5 de Janeiro de 2014. Disponível em: <<http://rredc.nrel.gov/solar/calculators/PVWATTS/version1/>>

PEREIRA, Renée. **Orçado em r\$ 16 bilhões, custo da usina de belo monte já supera os R\$ 30 bilhões**. São Paulo, 2013. Disponível em: <<http://economia.estadao.com.br/noticias/economia-geral,orcado-em-r-16-bilhoes-custo-da-usina-de-belo-monte-ja-supera-os-r-30-bilhoes,153398,0.htm>>. Acesso em: 04 fev. 2014.

PRASAD, Deo; SNOW, Mark. **Designing with solar power: A source book for building integrated photovoltaics (BIPV)**. Mulgrave: Images Publishing, 2005

PTI - Parque tecnológico de Itaipu. **Centro de Estudos do Biogás**. Disponível em: <<http://www.pti.org.br/biogas>>. Acesso em: 2 mar. 2014.

REY, Oriana. **Um olhar para as grandes perdas de energia no sistema de transmissão elétrico brasileiro**. In: INSTITUTO SOCIOAMBIENTAL - ISA (Brasil) (Ed.). O Setor Elétrico Brasileiro e a Sustentabilidade no Século 21: Oportunidades e Desafios. Brasília: Ed. Paula Franco Moreira, 2012. p. 41-46.

ROSSI, Amanda; BRAMATTI, Daniel. **Empreiteiras lideram ranking de doação privada**. 2012. Disponível em: <<http://www.estadao.com.br/noticias/politica,empreiteiras-lideram-ranking-de-doacao-privada,930787,0.htm>>. Acessado em: 20 de Novembro 2013.

SCHUMACHER, E. F. **O negócio é ser pequeno: um estudo de economia que leva em conta as pessoas (Small is beautiful)**. Trad. Octávio Alves Filho, Rio de Janeiro: Zahar Editores, 1977.

SERAPHIM, Odivaldo José, SIQUEIRA, Jair Antonio Cruz, SILVA, Carliane Diniz e et al. **Eficiência energética de módulos fotovoltaicos mono e poli-cristalinos em função da radiação solar global..** In: ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL, 5., 2004, Campinas. Proceedings online... Available from: <http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=MSC0000000022004000100049&lng=en&nrm=abn>. Acess on: 17 Dec. 2014.

SISSINE, F. **Issue Brief for Congress, USA Congressional Research Service - Energy Efficiency: Budget, Oil Conservation, and Electricity Conservation Issues.** Resources, Science, and Industry Division. The Library of Congress. Washington, 2002.

SOLARGIS, 2014 - **Free Download of Solar Radiation Maps: Global Horizontal Irradiation (GHI).** Acessado em 04 de Março de 2014: < <http://solargis.info/doc/71>>

SURYA URZA ENTERPRISES - **Solar cell** - Acessado em 04 de Março de 2014: <<http://suryaurza.com/solar-cell/>>

TAVARES, S. F. **Metodologia de Análise do Ciclo de Vida Energético de Edificações Residenciais Brasileiras.** Florianópolis, 2006, 225 p. Tese (Doutorado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina.

TFS SOLAR, **How solar works** - Acessado em 04 de Março de 2014 < <http://tfssolar.com/residential/residential-solar-pv/how-it-works/>>

TIRAPELLE, Guilherme Alfredo Hobmeir; MURA, Laís Botassari; FRAZÃO, Lucas **Análise da viabilidade técnica de painéis solares fotovoltaicos conectados à rede, com backup de energia, instalados em postos de combustíveis** . 2013. Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica) - UTFPR. Curitiba.

TOLMASQUIM, M.T. e GUERREIRO, A. (coordenadores gerais) **Estatística e análise do mercado de energia elétrica – Boletim Mensal (mês base: Dezembro de 2007)** Empresa de pesquisa energética, Ministério das Minas e Energia, Rio de Janeiro, 2007

UNITED NATIONS. **International Year of Sustainable Energy for All.** Disponível em: <<http://www.un.org/en/events/sustainableenergyforall/>>. Acesso em: 4 fev. 2014.

9. Anexos

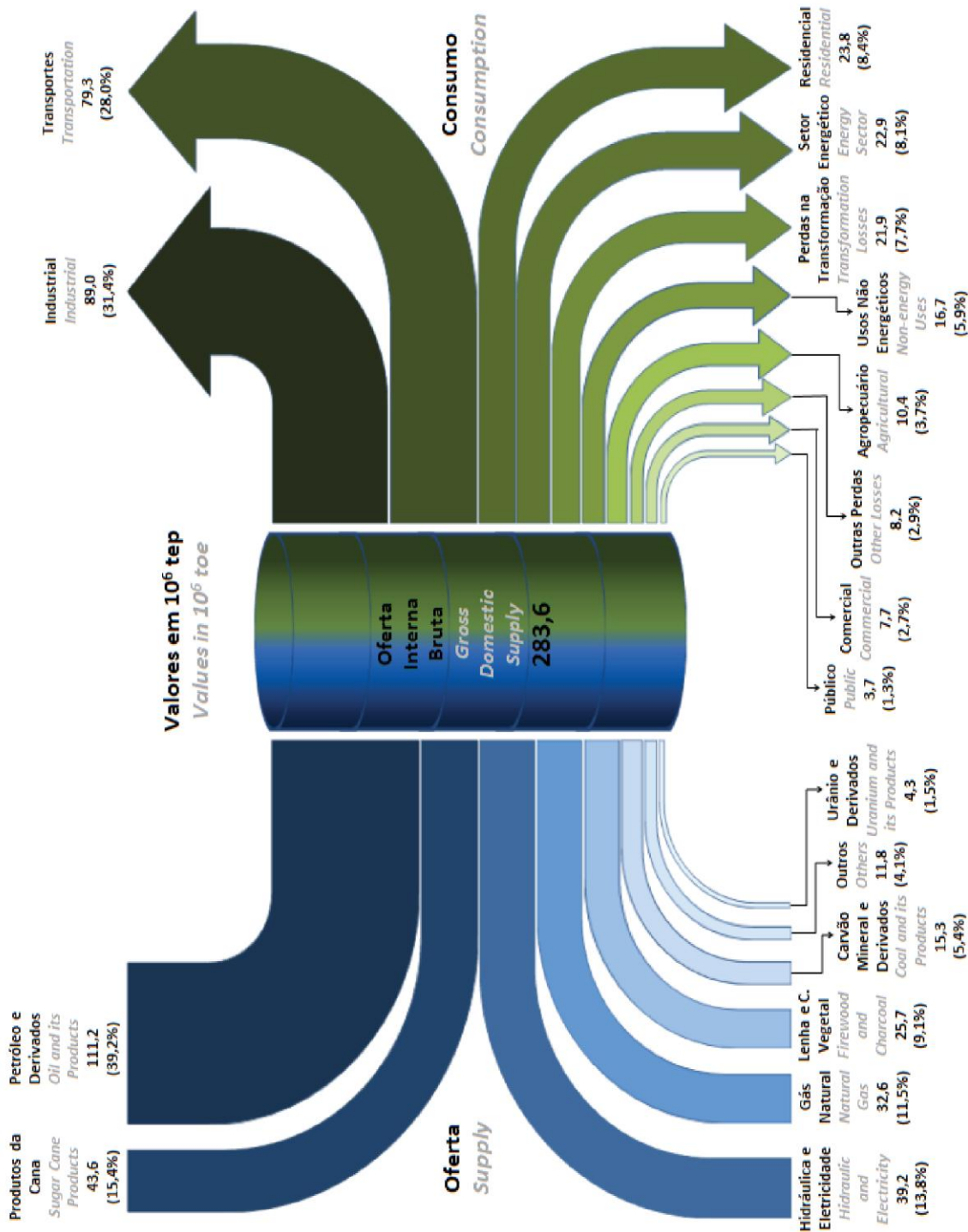


Figura 19 - Fluxo energético total no Brasil em 2012. Fonte: EPE

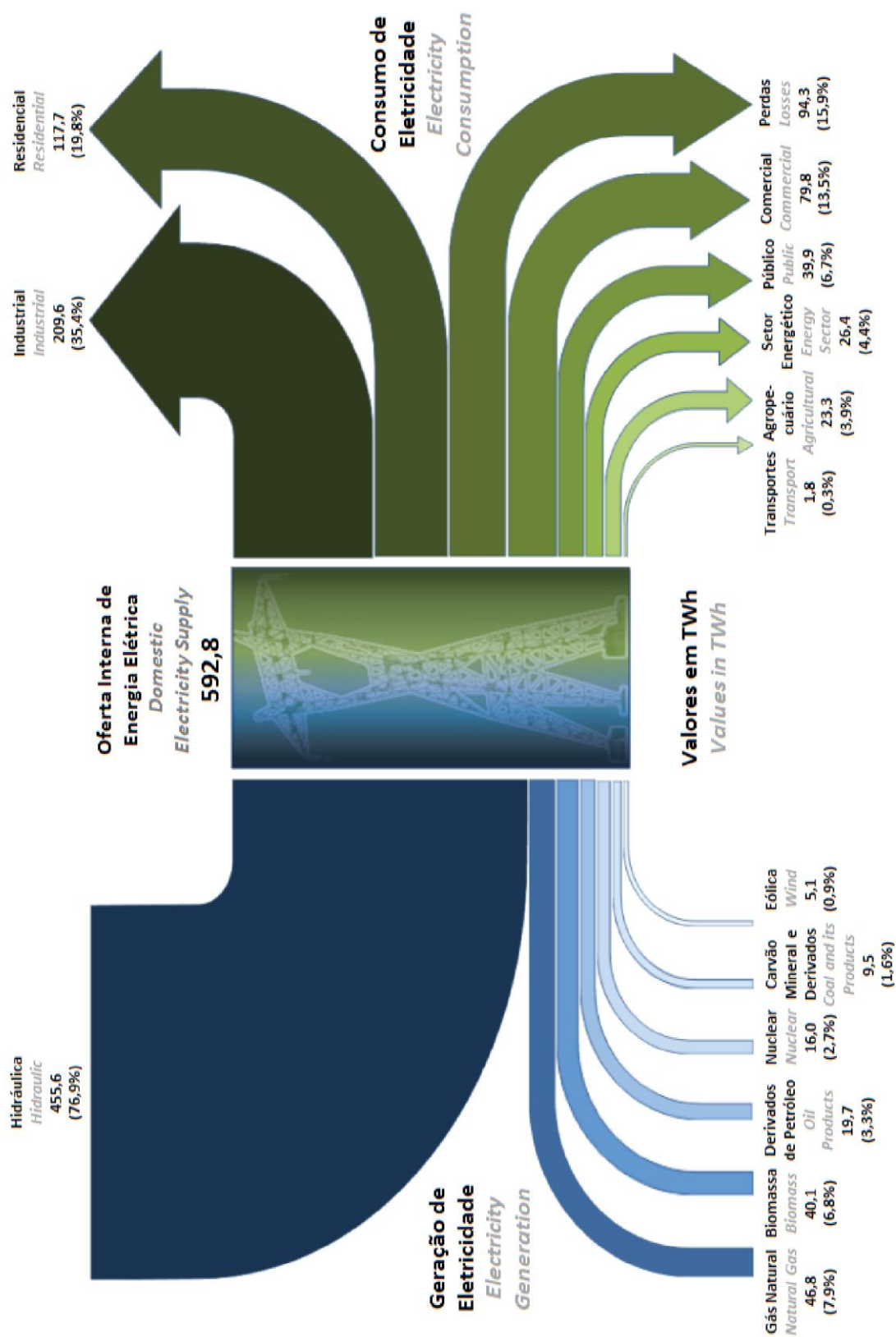


Figura 20 - Fluxo de energia elétrica total no Brasil em 2012. Fonte: EPE

Tabela 7 - Listagem geral de pedidos de ligação pra micro e mini geração distribuída no estado do Paraná recebidos até a data de 14 de Novembro de 2013. Fonte: COPEL

MICRO E MINI GERAÇÃO - SISTEMA DE COMPENSAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA								
ITEM	NOME DA USINA	FONTE	LOCAL	POTÊNCIA (kW)	NÍVEL DE TENSÃO	SITUAÇÃO	DATA DE LIGAÇÃO	REGISTRO NA ANEEL
1	José Carlos Colombari	BIOGÁS	São Miguel do Iguaçu	80	BT	Ligada	mai/13	Concluído
2	ELCO Eng. De Montagens	FOTOVOLTAICA	Curitiba	8,6	BT	Ligada	out/13	Em solicitação
3	Eduardo de Araújo Gomes	FOTOVOLTAICA	Pinhais	2,3	BT	Ligada	out/13	Em solicitação
4	-	FOTOVOLTAICA	Curitiba	1	BT	Aguardando resp. cliente	-	-
5	-	FOTOVOLTAICA	Curitiba	2,3	MT	Em análise	-	-
6	-	BIOGÁS	Foz do Iguaçu	20	BT	Em análise	-	-
7	-	FOTOVOLTAICA	Londrina	2,43	BT	Em análise	-	-
8	-	FOTOVOLTAICA	Cascavel	1	BT	Em análise	-	-
9	-	FOTOVOLTAICA	Cascavel	3	BT	Em análise	-	-
10	-	FOTOVOLTAICA	Francisco Beltrão	2	BT	Em análise	-	-
11	-	FOTOVOLTAICA	Ponta Grossa	1,68	BT	Em análise	-	-
12	-	FOTOVOLTAICA	Ponta Grossa	1,68	BT	Em análise	-	-
13	-	HIDRÁULICA	Mangueirinha	60	BT	Em estudo	-	-
14	-	BIOGÁS	Nova Londrina	480	MT	Em estudo	-	-
15	-	BIOGÁS	Céu Azul	130	MT	Em estudo	-	-

Tabela 8 - Resultados das simulações de geração de energia fotovoltaica utilizando-se o software PVWATTS para a cidade de Munique. Fonte: PVWATTS



AC Energy
&
Cost Savings



Simulação de geração de energia elétrica por 1kWp de painéis fotovoltaicos fixos.

Station Identification	
City:	Munich
Country/Province:	DEU
Latitude:	48.13° N
Longitude:	11.70° E
Elevation:	529 m
Weather Data:	IWEC
PV System Specifications	
DC Rating:	1.00 kW
DC to AC Derate Factor:	0.750
AC Rating:	0.75 kW
Array Type:	Fixed Tilt
Array Tilt:	48.1°
Array Azimuth:	180.0°
Energy Specifications	
Energy Cost:	0.1554 euro/kWh

Results			
Month	Solar Radiation (kWh/m ² /day)	AC Energy (kWh)	Energy Value (euro)
1	1.41	31	4.82
2	2.70	56	8.70
3	3.14	70	10.88
4	4.35	94	14.61
5	5.28	113	17.56
6	4.45	91	14.14
7	5.30	110	17.09
8	4.90	103	16.01
9	3.78	77	11.97
10	2.96	63	9.79
11	1.47	29	4.51
12	1.08	22	3.42
Year	3.41	858	133.33

[Output Hourly Performance Data](#)

[About the Hourly Performance Data](#)

[Output Results as Text](#)

[Saving Text from a Browser](#)

Tabela 9 - Resultados das simulações de geração de energia fotovoltaica utilizando-se o software PVWATTS para a cidade de Hamburgo. Fonte: PVWATTS



AC Energy
&
Cost Savings



Simulação de geração de energia elétrica por kWp de painéis fotovoltaicos fixos.

Station Identification	
City:	Hamburg
Country/Province:	DEU
Latitude:	53.63° N
Longitude:	10.00° E
Elevation:	16 m
Weather Data:	IWEC
PV System Specifications	
DC Rating:	1.00 kW
DC to AC Derate Factor:	0.750
AC Rating:	0.75 kW
Array Type:	Fixed Tilt
Array Tilt:	53.6°
Array Azimuth:	180.0°
Energy Specifications	
Energy Cost:	0.1554 euro/kWh

Results			
Month	Solar Radiation (kWh/m ² /day)	AC Energy (kWh)	Energy Value (euro)
1	0.81	15	2.33
2	1.80	36	5.59
3	2.94	65	10.10
4	4.24	92	14.30
5	4.77	102	15.85
6	4.43	90	13.99
7	4.15	87	13.52
8	4.10	87	13.52
9	3.09	64	9.95
10	2.06	44	6.84
11	1.26	25	3.88
12	0.63	11	1.71
Year	2.86	718	111.58

Output Hourly Performance Data

About the Hourly Performance Data

Output Results as Text

Saving Text from a Browser

Tabela 10 - Resultados das simulações de geração de energia fotovoltaica utilizando-se o software PVWATTS para a cidade de Sevilla. Fonte: PVWATTS



AC Energy
&
Cost Savings



Simulação de geração de energia elétrica por 1kWp de painéis fotovoltaicos fixos.

Station Identification	
City:	Sevilla
Country/Province:	ESP
Latitude:	37.42° N
Longitude:	5.90° W
Elevation:	31 m
Weather Data:	IWEC
PV System Specifications	
DC Rating:	1.00 kW
DC to AC Derate Factor:	0.750
AC Rating:	0.75 kW
Array Type:	Fixed Tilt
Array Tilt:	37.4°
Array Azimuth:	180.0°
Energy Specifications	
Energy Cost:	0.1215 euro/kWh

Results			
Month	Solar Radiation (kWh/m ² /day)	AC Energy (kWh)	Energy Value (euro)
1	4.09	91	11.06
2	4.85	96	11.66
3	5.96	127	15.43
4	5.78	119	14.46
5	6.63	138	16.77
6	6.51	127	15.43
7	7.00	138	16.77
8	7.05	141	17.13
9	6.30	122	14.82
10	5.05	107	13.00
11	3.99	84	10.21
12	3.75	83	10.08
Year	5.59	1375	167.06

[Output Hourly Performance Data](#)

[About the Hourly Performance Data](#)

[Output Results as Text](#)

[Saving Text from a Browser](#)

Tabela 11 - Resultados das simulações de geração de energia fotovoltaica utilizando-se o software PVWATTS para a cidade de Santander. Fonte: PVWATTS



AC Energy
&
Cost Savings



(Type comments here to appear on printout; maximum 1 row of 90 characters.)

Station Identification	
City:	Santander
Country/Province:	ESP
Latitude:	43.47° N
Longitude:	3.82° W
Elevation:	40 m
Weather Data:	IWEC
PV System Specifications	
DC Rating:	1.00 kW
DC to AC Derate Factor:	0.750
AC Rating:	0.75 kW
Array Type:	Fixed Tilt
Array Tilt:	43.5°
Array Azimuth:	180.0°
Energy Specifications	
Energy Cost:	0.1215 euro/kWh

Results			
Month	Solar Radiation (kWh/m ² /day)	AC Energy (kWh)	Energy Value (euro)
1	2.13	44	5.35
2	3.45	69	8.38
3	3.92	88	10.69
4	4.34	91	11.06
5	4.54	99	12.03
6	4.80	99	12.03
7	4.84	101	12.27
8	4.98	106	12.88
9	4.36	89	10.81
10	3.45	73	8.87
11	2.09	42	5.10
12	2.02	42	5.10
Year	3.74	943	114.57

Output Hourly Performance Data

About the Hourly Performance Data

Output Results as Text

Saving Text from a Browser

Tabela 12 - Resultados das simulações de geração de energia fotovoltaica utilizando-se o software PVWATTS para a cidade de Fortaleza. Fonte: PVWATTS



AC Energy
&
Cost Savings



Simulação de geração de energia elétrica por 1kWp de painéis fotovoltaicos fixos.

Station Identification	
City:	Fortaleza - Pinto Mar
Country/Province:	BRA
Latitude:	3.78° S
Longitude:	38.53° W
Elevation:	25 m
Weather Data:	SWERA
PV System Specifications	
DC Rating:	1.00 kW
DC to AC Derate Factor:	0.750
AC Rating:	0.75 kW
Array Type:	Fixed Tilt
Array Tilt:	3.8°
Array Azimuth:	0.0°
Energy Specifications	
Energy Cost:	0.2890 real/kWh

Results			
Month	Solar Radiation (kWh/m ² /day)	AC Energy (kWh)	Energy Value (real)
1	5.50	114	32.95
2	5.42	101	29.19
3	5.04	104	30.06
4	4.80	96	27.74
5	5.26	109	31.50
6	5.09	102	29.48
7	5.33	111	32.08
8	6.10	128	36.99
9	6.37	130	37.57
10	6.18	130	37.57
11	5.87	118	34.10
12	5.39	112	32.37
Year	5.53	1356	391.88

[Output Hourly Performance Data](#)

[About the Hourly Performance Data](#)

[Output Results as Text](#)

[Saving Text from a Browser](#)

Tabela 13 - Resultados das simulações de geração de energia fotovoltaica utilizando-se o software PVWATTS para a cidade de Curitiba. Fonte: PVWATTS



AC Energy
&
Cost Savings



Simulação de geração de energia elétrica por 1kWp de painéis fotovoltaicos fixos.

Station Identification	
City:	Curitiba/Afonso Pen
Country/Province:	BRA
Latitude:	25.52° S
Longitude:	49.17° W
Elevation:	908 m
Weather Data:	SWERA
PV System Specifications	
DC Rating:	1.00 kW
DC to AC Derate Factor:	0.750
AC Rating:	0.75 kW
Array Type:	Fixed Tilt
Array Tilt:	25.5°
Array Azimuth:	0.0°
Energy Specifications	
Energy Cost:	0.2890 real/kWh

Results			
Month	Solar Radiation (kWh/m ² /day)	AC Energy (kWh)	Energy Value (real)
1	4.93	102	29.48
2	4.83	91	26.30
3	4.68	98	28.32
4	4.46	91	26.30
5	3.98	85	24.57
6	3.98	84	24.28
7	3.83	82	23.70
8	4.60	99	28.61
9	4.12	84	24.28
10	4.51	94	27.17
11	4.98	100	28.90
12	4.71	98	28.32
Year	4.47	1108	320.21

Output Hourly Performance Data

About the Hourly Performance Data

Output Results as Text

Saving Text from a Browser